

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Krešimir Tišljar

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Branko Bauer, dipl. ing.

Student:

Krešimir Tišljar

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc Branku Baueru na pomoći i savjetima prilikom izrade ovog rada. Zahvaljujem se svojim kolegama, prijateljima te posebice svojoj obitelji koji su mi pružali podršku tijekom čitavog studija.

Krešimir Tišljar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **KREŠIMIR TIŠLJAR**

Mat. br.: 0035179105

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **SIMULACIJA TLAČNOG LIJEVANJA ODLJEVKA OD AI LEGURE**

Naslov rada na engleskom jeziku: **DIE CASTING SIMULATION OF AI ALLOY PART**

Opis zadatka:

U okviru rada potrebno je proučiti tehnologiju tlačnog lijevanja i prikupiti podatke o konstrukciji i izradi kalupa za lijevanje aluminijevih legura.

Za zadani odljevak, potrebno je konstruirati CAD model s uljevnim sustavom te napraviti simulaciju u programskom paketu QuikCAST. Analizirati i optimirati parametre lijevanja, s obzirom na kvalitetu odljevka.

Zadatak zadan:

5. svibnja 2016.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

Rok predaje rada:

7. srpnja 2016.

Predviđeni datum obrane:

13., 14. i 15. srpnja 2016.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Franjo Cajner



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **KREŠIMIR TIŠLJAR** Mat. br.: 0035179105

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **SIMULACIJA TLAČNOG LIJEVANJA ODLJEVKA OD AI LEGURE**

Naslov rada na engleskom jeziku: **DIE CASTING SIMULATION OF AI ALLOY PART**

Opis zadatka:

U okviru rada potrebno je proučiti tehnologiju tlačnog lijevanja i prikupiti podatke o konstrukciji i izradi kalupa za lijevanje aluminijevih legura.
Za zadani odljevak, potrebno je konstruirati CAD model s uljevnim sustavom te napraviti simulaciju u programskom paketu QuikCAST. Analizirati i optimirati parametre lijevanja, s obzirom na kvalitetu odljevka.

Zadatak zadan:

5. svibnja 2016.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

Rok predaje rada:

7. srpnja 2016.

Predvideni datum obrane:

13., 14. i 15. srpnja 2016.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. OPĆENITO O TLAČNOM LIJEVU	2
3. STROJEVI ZA TLAČNI LIJEV	4
3.1. Strojevi sa hladnom komorom	5
3.2. Strojevi sa toplom komorom	7
4. LEGURE ZA TLAČNI LIJEV	9
4.1. Aluminijske legure	10
4.2. Cinkove legure	12
4.3. Magnezijeve legure	13
4.4. Bakrove legure	14
5. TEHNOLOŠKI PARAMETRI TLAČNOG LIJEVANJA.....	16
5.1. Brzina klipa u prvoj fazi.....	17
5.2. Brzina klipa u drugoj fazi.....	19
5.3. Tlak treće faze	21
5.4. Temperiranje kalupa.....	23
6. GREŠKE U TLAČNIM ODLJEVCIMA	26
6.1. Plinska poroznost	26
6.2. Oksidni uključci	28
6.3. Tvrdi mjesta.....	29
6.4. Hladni zavari	30
6.5. Tople pukotine.....	32
6.6. Plinski mjehuri	33

7. SIMULACIJA TLAČNOG LIJEVA	34
8. EKSPERIMENTALNI DIO	37
8.1. Odljevnik	37
8.2. Uljevni sustav	38
8.2.1. Rezultati simulacije za uljevni sustav sa jednim ušćem (bez preljeva).....	41
8.2.1.1. Rezultati simulacije za uljevni sustav sa jednim ušćem (v1)	43
8.2.1.2. Rezultati simulacije za uljevni sustav sa jednim ušćem (v2)	43
8.2.2. Rezultati simulacije za uljevni sustav sa dva ušća (bez preljeva)	45
8.2.2.1. Rezultati simulacije za uljevni sustav sa dva ušća (v1)	47
8.2.2.2. Rezultati simulacije za uljevni sustav sa dva ušća (v2)	48
8.3. Gibanje klipa	48
8.4. Poroznost	51
8.4.1. Poroznost uljevnih sustava sa jednim ušćem	51
8.4.2. Poroznost uljevnih sustava sa dva ušća	53
8.5. Utjecaj temperature kokile	56
9. ZAKLJUČAK	60
LITERATURA	62

POPIS SLIKA

Slika 2.1, Podjela postupaka lijevanja [1]	2
Slika 2.2, Primjeri tlačnih odljevaka [1][3]	3
Slika 3.1, Horizontalni stroj sa hladnom komorom [4]	6
Slika 3.2, Ciklus lijevanja na stroju sa hladnom komorom [5]	6
Slika 3.3, Ciklus ulijevanja na stroju sa toplom komorom [5]	8
Slika 5.1, Shematski prikaz puta i tlaka klipa po fazama [9]	17
Slika 5.2, Formiranje vala tokom spore faze [11]	18
Slika 5.3, Multiplikator [2]	23
Slika 5.4, Mehanizmi prijenosa topline u kalupu [10]	24
Slika 5.5, Raspored temperatura kalupa tijekom ciklusa lijevanja [2]	25
Slika 6.1, Kvalifikacijski niz za procjenu poroznosti aluminijskog tlačnog lijeva [15]	27
Slika 6.2, Tlačni aluminijski odljevak s oksidnim uključcima [15]	29
Slika 6.3, Aluminijski tlačni odljevka s tvrdim uključcima [15]	30
Slika 6.4, Hladni zavar [15]	31
Slika 6.5, Tople pukotine [16]	32
Slika 6.6, Plinski mjehuri [4]	33
Slika 7.1, Poroznost u odljevku (gore – simulacija; dolje-odljevak) [20]	36
Slika 8.1, Dimenzije odljevka	37
Slika 8.2, Elementi uljevnog sustav za tlačni lijev [21]	38
Slika 8.3, Uljevni sustav s jednim ušćem: a) bez preljeva, b) prva varijanta, c) druga varijanta	39
Slika 8.4, Uljevni sustav s dva ušća: a) bez preljeva, b) prva varijanta, c) druga varijanta	40
Slika 8.5, Rezultati simulacije uljevnog sustava s jednim ušćem (bez preljeva), $t=0,4056$ s	41
Slika 8.6, Rezultati simulacije uljevnog sustava s jednim ušćem (bez preljeva), $t=0,4105$ s	42
Slika 8.7, Rezultati simulacije uljevnog sustava s jednim ušćem (bez preljeva), $t=0,4122$ s	42
Slika 8.8, Rezultati simulacije prve varijante uljevnog sustava s jednim ušćem, $t=0,4095$ s	43
Slika 8.9, Rezultati simulacije druge varijante uljevnog sustava s jednim ušćem, $t=0,4072$ s	44
Slika 8.10, Rezultati simulacije druge varijante uljevnog sustava s jednim ušćem, $t=0,4108$ s	44
Slika 8.11, Rezultati simulacije uljevnog sustava s dva ušća (bez preljeva), $t=0,4782$ s	45
Slika 8.12, Rezultati simulacije uljevnog sustava s dva ušća (bez preljeva), $t=0,4822$ s	46
Slika 8.13, Rezultati simulacije uljevnog sustava s dva ušća (bez preljeva), $t=0,4846$ s	46

Slika 8.14, Rezultati simulacije prve varijante uljevnog sustava s dva ušća, $t=0,4802$ s.....	47
Slika 8.15, Rezultati simulacije prve varijante uljevnog sustava s dva ušća, $t=0,4829$ s.....	47
Slika 8.16, Rezultati simulacije druge varijante uljevnog sustava s dva ušća, $t=0,4803$ s.....	48
Slika 8.17, Gibanje klipa za vrijeme prve faze	49
Slika 8.18, Gibanje klipa kod popunjenosti tlačne komore od 27%	50
Slika 8.19, Gibanje klipa kod popunjenosti tlačne komore od 32%	51
Slika 8.20, Poroznost uljevnog sustava s jednim ušćem (bez preljeva)	52
Slika 8.21, Poroznost prve varijante uljevnog sustava s jednim ušćem	52
Slika 8.22, , Poroznost druge varijante uljevnog sustava s jednim ušćem	53
Slika 8.23, Poroznost uljevnog sustava s dva ušća (bez preljeva)	54
Slika 8.24, Poroznost prve varijante uljevnog sustava s dva ušća	54
Slika 8.25, Poroznost druge varijante uljevnog sustava s dva ušća	55
Slika 8.26, Tijek punjena kalupne šupljine pri temperaturi kokile: a) 150°C , b) 210°C , c) 250°C	56
Slika 8.27, Tijek skrućivanja odljevka pri temperaturi kokile: a) 150°C , b) 210°C , c) 250°C	57
Slika 8.28, Utjecaj temperature predgrijavanja kokile na tijek skrućivanja odljevka.....	58
Slika 8.29, Poroznost pri temperaturi predgrijavanja kokile od 150°C	59
Slika 8.30, Poroznost pri temperaturi predgrijavanja kokile od 250°C	59

POPIS TABLICA

Tablica 4.1, Svojstva aluminijskih legura za tlačni lijev [8]	12
Tablica 4.2, Svojstva cinkovih legura za tlačni lijev [8]	13
Tablica 4.3, Svojstva magnezijevi legura za tlačni lijev [8]	14
Tablica 4.4, Svojstva bakrovih legura za tlačni lijev [8]	15
Tablica 5.1, Preporučeno vrijeme punjenja kalupa s obzirom na srednje debljine stjenke odljevka [2]	19
Tablica 5.2, Orijentacijske vrijednosti brzine taljevine u ušću [2]	19
Tablica 5.3, Tlak lijevanja za različite legure i vrste odljevaka [2]	22
Tablica 8.1, Parametri lijevanja za uljevni sustav sa jednim ušćem	41
Tablica 8.2, Parametri lijevanja za uljevni sustav sa dva ušća	45

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
v_k	m/s	Brzina klipa
A_k	m ²	Površina klipa
v_u	m/s	Brzina taline u ušću
A_u	m ²	Presjek ušća
ρ	kg/m ³	Gustoća taljevine
g	m/s ²	Ubrzanje sile teže
h_u	m	Visina taline u ušću
h_k	m	Visina taline u tlačnoj komori
p_u	Pa	Tlak u ušću
p_k	Pa	Tlak u tlačnoj komori
η	-	Koeficijent učinka taline s obzirom na otpor strujanju

SAŽETAK

U ovom radu opisana je tehnologija tlačnog lijeva. Opisane su izvedbe strojeva za tlačni lijev, materijali koji se primjenjuju te parametri kojima se utječe na tijek procesa i svojstva odljevka. Nadalje su opisani najčešći tipovi grešaka kod tlačnog lijeva. U eksperimentalnom dijelu rada za zadani odljevak konstruirane su dvije izvedbe uljevnog sustava za tlačni lijev: izvedba uljevnog sustava sa jednim ušćem te izvedba uljevnog sustava sa dva ušća. Za svaku izvedbu uljevnog sustava izrađene su dvije varijante sa različitim položajima preljeva te su provedene simulacije u programskom paketu QuikCAST 2014. Za obje izvedbe uljevnog sustava provedena je optimizacija gibanja tlačnog klipa kako bi se postigao željeni oblik vala i izbjeglo zarobljavanje zraka. Na posljetku je istražen utjecaj temperature predgrijavanja kokile na tijek punjenja i skrućivanje odljevka.

Ključne riječi: tlačni lijev, parametri, spora faza, simulacija, QuikCAST

SUMMARY

The subject of this thesis is high pressure die casting process. Types of machines used, the alloys used and parameters which affect the course of the process and quality of the casting are described. Furthermore, most common defects in high pressure die casting process are described. In the experimental part of the thesis, two versions of gating system are designed for a given casting: version with one gate and version with two gates. For each version two additional variations of gating system are designed, each with a different overflow placement, and simulation of the process carried out using the QuikCAST 2014 software. For both gating system versions, optimization of plunger movement during a slow shot is carried out in order to achieve the desired wave shape and avoid air entrainment. Lastly, an effect of die temperature on the filling of the die cavity and solidification of the casting is investigated.

Key words: high pressure die casting, parameters, slow shot, simulation, QuikCAST

1. UVOD

Lijevanje je jedan od najčešće korištenih postupaka obrade metala. Lijevanje pronalazi primjenu u mnogim granama industrije jer omogućuje proizvodnju proizvoda od metala različitih dimenzija te kompleksnosti geometrije i dobrih mehaničkih svojstava. Osim toga, zbog visoke produktivnosti te mogućnosti lake izrade replika lijevanje je iznimno pogodno i za serijsku i masovnu proizvodnju. Postupci se vrlo lako mogu i automatizirati što dodatno pridonosi ionako velikoj proizvodnosti ljevačkih postupaka. Zahvaljujući razvoju metalurgije danas je dostupan velik broj legura koje je moguće lijevati [1]. Također je razvijen i velik broj postupaka lijevanja od kojih svaki ima neke prednosti i ograničenja glede postizivih svojstava odljevaka, najvećih dimenzija odljevaka, odabira legure itd. Lijevanje je kompleksan postupak te postizanje željenih svojstava konačnog proizvoda nije jednostavno. Na konačna svojstva odljevka utjecaj imaju mnogi parametri kao sastav legure, obrade taljevine, konstrukcija odljevka, konstrukcija alata (kalupa), parametri stroja itd.

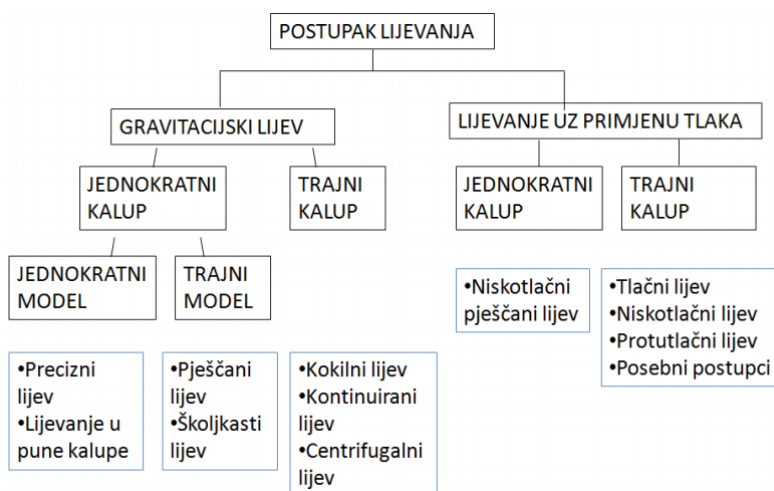
Predmet ovog rada je postupak tlačnog lijeva. Tlačni lijev je jedan od postupaka ulijevanja taljevine u stalne kalupe te ga karakterizira primjena visokog tlaka za punjenje kalupa taljevinom. Uglavnom se koristi za proizvodnju neželjeznih legura, najčešće legura aluminijske. Strojevi za tlačni lijev specifični su po svojoj izvedbi te su ovom radu objašnjene razlike između dvije osnovne izvedbe, strojeva sa hladnom i strojeva sa toplom komorom. Velike brzine taljevine postižu se pokretanjem tlačnog klipa te se upravo podešavanjem brzina gibanja klipa u pojedinim fazama punjenja kalupa te primjenom naknadnog tlaka nakon popunjavanja značajno utječe na svojstva odljevka te eventualno formiranje grešaka. U svrhu postizanja kombinacije parametara kojima se proizvode odljevci zadovoljavajuće kvalitete vrlo često se koriste računalne simulacije. Simulacijom procesa lijevanja moguće je postići željene kombinacije parametara, predvidjeti moguće probleme u konstrukciji uljevnog sustava te predvidjeti pojavu grešaka.

2. OPĆENITO O TLAČNOM LIJEVU

Ljevarstvo je tehnologija praoblikovanja metala kojom se rastaljeni metala ulijeva u kalup u kojem skrućivanjem poprima oblik i dimenzije kalupne šupljine. Za izradu različitih predmeta od metala kao tehnologija koristi se već više od 5000 godina, a danas je poznat velik broj različitih tehnologija lijevanja kojima je moguće proizvesti širok spektar proizvoda. Izrada dobrih odljevaka zahtjeva veliko znanje i vještinu jer proces nastajanja odljevka nije vidljiv, odnosno metal popunjava zatvoreni kalup. Postupak lijevanja može se podijeliti u pet osnovnih koraka:

1. priprema početnog bezobličnog materijala,
2. postizanje stanja početnog materijala pogodnog za lijevanje,
3. punjenje alata za lijevanje materijalom pogodnim za lijevanje,
4. prijelaz materijala u oblikovljivo stanje, u alatu za lijevanje
5. vađenje oblikovanog proizvoda iz alata za lijevanje [1].

Tehnologije lijevanja mogu se podijeliti na nekoliko načina. Postupci lijevanja dijele se prema ulijevoj sili na gravitacijsko lijevanje i lijevanje uz primjenu tlaka. Nadalje, mogu se podijeliti s obzirom na postupke sa jednokratnim kalupima i postupke sa stalnim kalupima. Kod lijevanja gravitacijskom silom kalup se popunjava djelovanjem sile teže te brzina lijevanja ovisi o visini lijevanja i izvedbi uljevnog sustava. Kod lijevanja uz primjenu tlaka postižu se velike brzine popunjavanja kalupa što skraćuje ciklus proizvodnje odljevaka. Navedene podjele shematski su prikazane na slici 2.1 [1].



Slika 2.1, Podjela postupaka lijevanja [1]

Tlačni lijev je je proces proizvodnje odljevaka u kojem se taljevina uvodi u trajni kalup pod visokim tlakom. Tlak se održava u kalupu sve dok se skrućivanje odljevka potpuno ne završi. Kalupi za tlačni lijev trebaju biti konstruirani tako da se omogući proizvodnja kompleksnih oblika odljevaka s visokim stupnjem točnosti dimenzija. U jednom kalupu moguće je odliti više desetaka tisuća odljevaka [2]. Tlačni lijev primjenjuje se u serijskoj i masovnoj proizvodnji. Proces je često automatiziran što omogućuje povećanje produktivnosti, poboljšanje kvalitete odljevaka te sniženje cijene gotovog proizvoda. Odljevci proizvedeni tlačnim lijevom koriste se u gotovo svim granama industrije, a najraširenija primjena je u automobilskoj industriji. Odljevke lijevane ovim postupkom karakteriziraju dobra mehanička svojstva te dimenzijska točnost. Najčešće se lijevaju legure aluminija, bakra, magnezija i cinka. Ovim je postupkom moguće lijevanje odljevaka različitih dimenzija i oblika pa se proizvode dijelovi kao što su blokovi motora i drugi dijelovi motora s unutarnjim izgaranjem, radijatori, zupčanici pa sve do okvira mobilnih telefona i dječjih igračaka [1]. Na slici 2.2 prikazani su neki primjeri odljevaka proizvedenih tehnologijom tlačnog lijeva.



Slika 2.2, Primjeri tlačnih odljevaka [1][3]

3. STROJEVI ZA TLAČNI LIJEV

Strojevi za tlačno lijevanje kompleksan su spoj mehaničkih, električnih te hidrauličkih sustava. Svaki od tih sustava sastoji se od brojnih komponenata od kojih svaka ima specifičnu zadaću te u kombinaciji sa ostalim komponentama omogućuju izvršavanje operacija potrebnih za proizvodnju odljevka. Mehaničke komponente čine elementi poput nosive konstrukcije, steznih ploča, vodilica i sl. Električni sustav čine elektromotori, elektromagnetni ventili, razni graničnici, senzori i sl. Hidraulički se sustav sastoji od hidrauličkih pumpi koje su glavni izvor energije potrebne za postizanje visokog tlaka te raznih hidrauličkih elementa čiji je zadatak upravljanje strujanjem hidrauličkog medija kroz stroj [4].

Hidraulički sustav omogućuje upravljanje položajem, brzinom te ubrzanjem pogonskog klipa čime se omogućuje optimiziranje tečenja taljevine prilikom punjenja kalupne šupljine u svrhu postizanja optimalnih tehnoloških parametara i najbolje moguće kvalitete odljevka [4]. Pogonski klip smješten je unutar tlačnog cilindra u koji se dovodi taljevina. Taljevina se u tlačni cilindar ulijeva ljevačkom žlicom ili je tlačni cilindar potpuno uronjen u taljevinu, ovisno o izvedbi stroja. Tlačni cilindar s jedne je strane zatvoren pogonskim klipom, a s druge strane se nalazi uljevni sustav putem kojeg se taljevina utiskuje u kalupnu šupljinu. Nakon popunjavanja kalupa i skrućivanja odljevka polovice kalupa se razdvajaju te se odljevak uklanja iz kalupa. Kalup se zatvara te se cijeli ciklus ponavlja.

Strojeve za tlačni lijev može se podijeliti u dvije osnovne skupine prema sustavu za ulijevanje taljevine: strojeve sa *hladnom komorom* i strojeve sa *toplom komorom*. Osim te glavne podjele, strojevi za tlačni lijev mogu se klasificirati i prema:

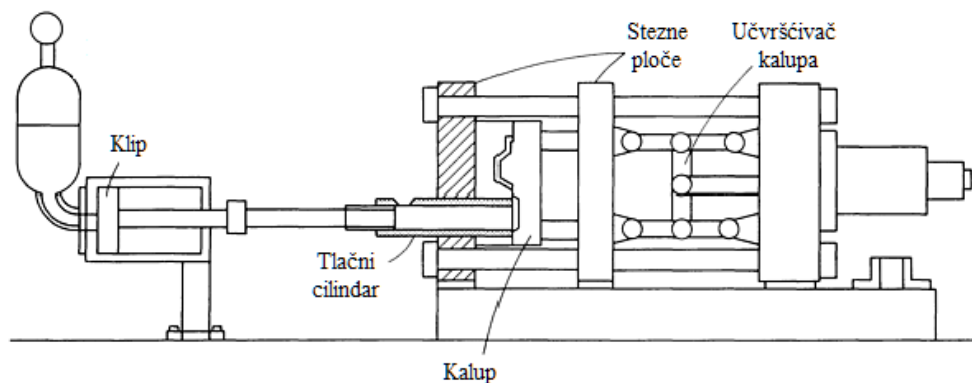
- položaju tlačne komore na:
 - strojeve s vertikalnom komorom te
 - strojeve sa horizontalnom komorom,
- prema snazi stroja na:
 - strojeve male snage,
 - strojeve srednje snage,
 - strojeve velike snage,

- prema stupnju univerzalnosti na:
 - univerzalne strojeve,
 - specijalne strojeve te
- prema stupnju automatizacije na:
 - poluautomatske strojeve i
 - automatske strojeve [2].

3.1. Strojevi sa hladnom komorom

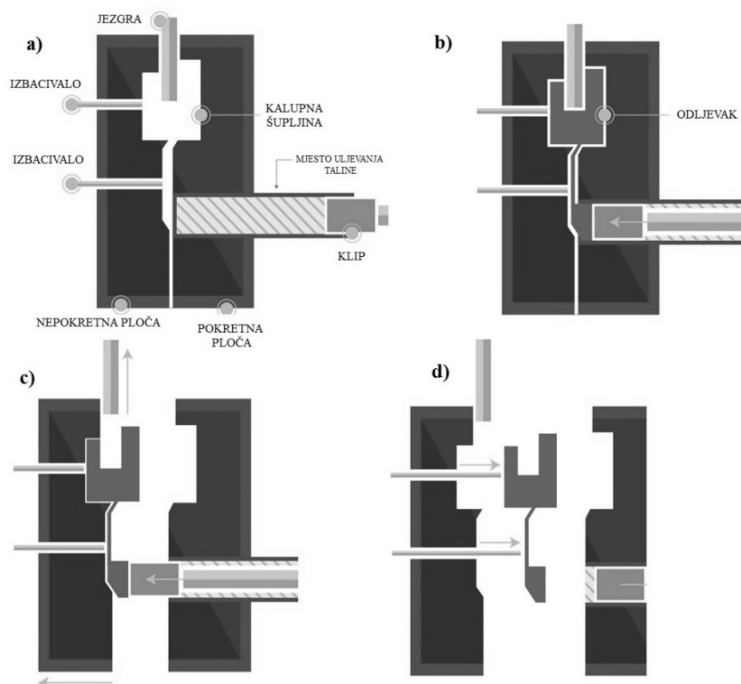
Osnovna razlika između strojeva sa hladnom komorom i toplom komorom je u načinu kako je talina dostavljena do sustava za ubrizgavanje. Kod strojeva sa hladnom komorom, peć za taljenje metala nije dio stroja te se rastaljeni metal mora, ručno ili automatizirano, dovesti od peći do stroja. Pri tome treba predvidjeti gubitke topline koji za to vrijeme nastaju pa temperatura taline u peći mora biti nešto viša nego predviđena temperatura ulijevanja. Volumen rastaljenog metala bi također trebao biti nešto veći od volumena potrebnog da se popuni kalupna šupljina kako bi se moglo nadoknaditi smanjenje volumena uslijed skrućivanja materijala [5]. Odmah nakon ulijevanja taline u tlačni cilindar pogonski klip utiskuje talinu u kalupnu šupljinu. Prema tome tlačni cilindar i klip nisu izloženi visokim temperaturama rastaljenog metala za cijelo vrijeme proizvodnje. Upravo iz tih razloga strojevi za lijevanje pod tlakom sa hladnom komorom pogodni su za lijevanje metala viših temperatura lijevanja (do 1000°C) kao što su legure aluminija i bakra. Jedan od nedostataka ovih strojeva u odnosu na one sa toplom komorom je nešto manja produktivnost. Broj lijevanja iznosi od 50 do 150 odljevaka na sat [2].

Strojevi sa hladnom komorom mogu se podijeliti na strojeve sa vertikalnom komorom i strojeve sa horizontalnom komorom. Najčešće se upotrebljavaju strojevi sa horizontalnom komorom zbog veće proizvodnosti, mogućnosti primjene većih tlakova itd. Strojevi sa vertikalnom komorom upotrebljavaju se ako geometrija odljevka to zahtjeva (kutijasti odljevci većih dubina i sl.) [2]. Osnovni elementi stroja sa hladnom horizontalnom komorom prikazani su na slici 3.1.



Slika 3.1, Horizontalni stroj sa hladnom komorom [4]

Ciklus proizvodnje na horizontalnom stroju sa hladnom komorom sastoji se od sljedećih koraka. Kalup se zatvara te se taljevina ulijeva u tlačnu komoru iz ljevačke žlice. Klip utiskuje taljevinu u kalupnu šupljinu te se visoki tlak održava sve dok se taljevina ne skrutne. Zajedno sa otvaranjem kalupa, pomiče se i klip kako bi se osiguralo da odljevak ostane u pomičnom dijelu kalupa te se izvlače jezgre, ukoliko ih ima nakon čega izbacivala guraju odljevak iz pokretnog dijela kalupa. Klip se vraća u početni položaj i cijeli se ciklus može ponoviti [6]. Ove faze shematski prikazuje slika 3.2.

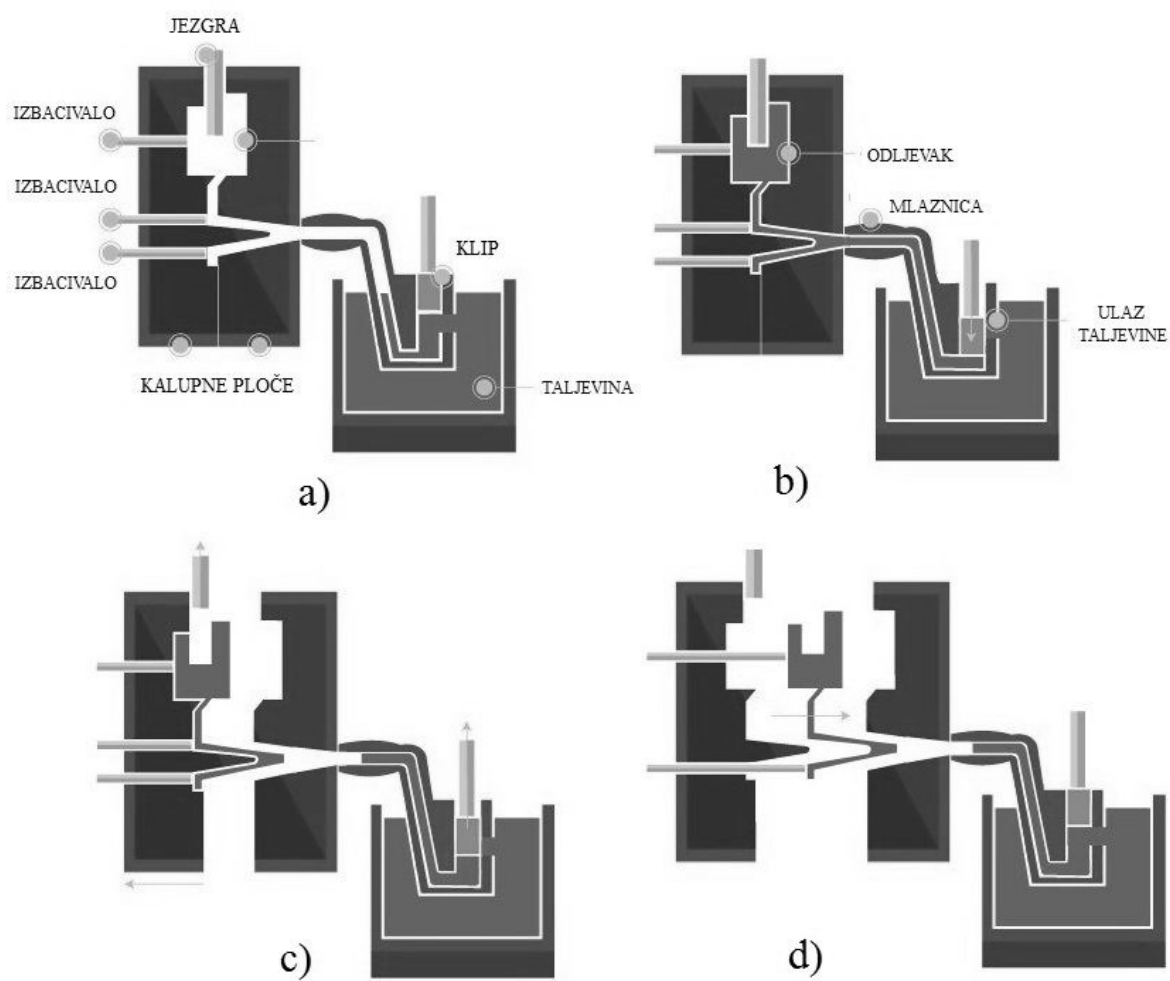


Slika 3.2, Ciklus lijevanja na stroju sa hladnom komorom [5]

3.2. Strojevi sa toplom komorom

Kod strojeva sa toplom komorom sustav za ubrizgavanje taljevine sastoji se od hidraulički pokretanog tlačnog klipa te spojne cijevi i mlaznice [2]. Spojna cijev i tlačni cilindar uronjeni su u taljevinu te su približno iste temperature kao i taljevina. Blizu vrha komore nalazi se otvor kroz koji rastaljeni metal iz lonca ulazi u tlačnu komoru. Pogonski klip postavljen je vertikalno te pomakom prema dolje tlači taljevinu koja tada teče spojnou cijevi do mlaznice. Mlaznica spaja spojnou cijev sa kalupom. Mlaznica je grijana kako unutar nje ne bi došlo do skrućivanja metala. Kako je sustav za ubrizgavanje uronjen u taljevinu, ovi su strojevi pogodni samo za lijevanje metala temperature tališta niže od one metala od kojih su izrađeni elementi sustava za ubrizgavanje kako ne bi došlo do njihova taljenja. Stoga se sa strojevima za tlačno lijevanje sa toplom komorom najčešće lijevaju legure cinka, olova, kositra i magnezija [6]. Strojeve sa toplom komorom lako je automatizirati te im je brzina rada od 50 do 500 ciklusa lijevanja na sat [2].

Na početku ciklusa kalup je zatvoren, dolazi do podizanja klipa pri čemu se tlačna komora puni rastaljenim metalom. Nakon toga dolazi do pokretanja pogonskog klipa koji potiskuje taljevinu kroz spojnou cijev, zatim kroz mlaznicu sve do kalupne šupljine. Visoki tlak se održava sve dok se taljevina ne skrutne. Kalup se otvara, izvlače se jezgre te se odljevak koji je ostao u pokretnom dijelu kalupa odvaja od kalupne ploče pomoću izbacivala te uklanja iz kalupa. Klip se vraća u početni položaj te se usred pada tlaka višak taline vraća iz mlaznice i spojne cijevi. Povratkom klipa u početni položaj ponovno je moguć ulaz taljevine iz lonca kroz otvor na komoru te se cijeli proces ponavlja [5]. Navedene faze shematski su prikazane na slici 3.3.



Slika 3.3, Ciklus ulijevanja na stroju sa toplom komorom [5]

4. LEGURE ZA TLAČNI LIJEV

Ljevačke legure mogu se podijeliti u dvije skupine: one podobnije za postupke kod kojih se ulijeva silom gravitacije i one podobnije za lijevanje pod visokim tlakom. Za postupke kod kojih nakon ulijevanja i skrućivanja dolazi do uništavanja kalupa (postupci lijevanja u jednokratne kalupe) dostupan je vrlo velik spektar različitih legura za lijevanje. Kod lijevanja u stalne kalupe postoji više specifičnih tehnoloških zahtjeva koje legura mora ispuniti pa je dostupan broj legura za takve postupke manji. Najmanju raznolikost dostupnih legura, s obzirom na tehnološke zahtjeve, ima proces visokotlačnog lijevanja [4].

Zahtjevi na kvalitetu i svojstva visokotlačnih odljevaka vrlo su veliki. Od odljevka se očekuju iznimna mehanička svojstva, dobra kvaliteta površine, točnost dimenzija itd. Osim potrebnih mehaničkih svojstava, legure trebaju imati i odgovarajuća ljevačka svojstva koja omogućuju uspješnu proizvodnju složenih odljevaka. Legure koje se upotrebljavaju za tlačni lijev trebaju imati:

- sposobnost popunjavanja kalupne šupljine,
- što nižu temperaturu lijevanja,
- dobru livljivost na temperaturi od 15°C do 20°C iznad likvidus temperature,
- neznatno skupljanje u tekućem stanju i pri skrućivanju odljevka,
- smanjenu sklonost otapanju plinova,
- dobru obradivost,
- dovoljnu čvrstoću i plastičnost kako bi se mogle oduprijeti silama koje se javljaju pri skrućivanju u procesu formiranja odljevka, izvlačenju metalnih jezgri i vađenju odljevka iz kalupa,
- minimalno skupljanje u krutom stanju radi smanjenja zaostalih naprezanja koja se pojavljuju zbog onemogućenog skupljanja odljevka,
- optimalne ekonomske pokazatelje kao što su: niska cijena, nedeficitarni osnovni materijal te mogućnost korištenja otpada [2].

Za lijevanje pod visokim tlakom uglavnom se upotrebljavaju legure aluminija, magnezija, cinka i bakra. U rijetkim slučajevima lijevaju se i legure olova, kositra te čelika [4].

4.1. Aluminijske legure

Svojstva zbog kojih aluminij i njegove legure imaju toliko široko područje primjene su atraktivan izgled, mala masa, dobra preradivost, dobra mehanička i fizikalna svojstva te otpornost na koroziju. Aluminij ima gustoću od $2,7 \text{ g/cm}^3$, što je otprilike jedna trećina gustoće čelika ($\rho_{\text{čelika}} = 7,83 \text{ g/cm}^3$), bakra ($\rho_{\text{bakra}} = 8,93 \text{ g/cm}^3$) ili mjedi ($\rho_{\text{mjedi}} = 8,53 \text{ g/cm}^3$). Pokazuje dobru otpornost na koroziju u mnogim medijima, uključujući atmosferu, vodu, slanu vodu, petrokemikalije te mnoge kemijske sustave. Zahvaljujući dobroj toplinskoj vodljivosti, otprilike 50 do 60% vodljivosti bakra, aluminijske legure pogodne su za izradu izmjenjivača topline, radijatora, glavi motora u automobilske industriji i sl. Aluminij nije feromagnetičan, zbog čega je pogodan za upotrebu u području elektronike. Aluminij je i nezapaljiv pa ga je moguće koristiti u uvjetima gdje postoji velika opasnost od eksplozije. Neotrovan je pa je često korišten kao materijal za izradu različitih spremnika i pakiranja u prehrambenoj industriji [7]. Kod tlačnog lijeva najčešće se koriste legure aluminija legirane sa bakrom, silicijem i magnezijem [2].

- *Al-Cu legure*

Al-Cu legure koje sadrže 4 do 5% bakra, uz prisustvo željeza, silicija te ponekad magnezija u obliku nečistoća toplinski su obradive aluminijske legure te mogu postići prilično veliku čvrstoću i dobru duktilnost. Legure sa nešto većim udjelom bakra, od 7 do 8%, nekada su bile jedne od najkorištenijih legura, no danas je njihova primjena vrlo ograničena jer ih sve više zamjenjuju Al-Si-Cu legure. Najznačajnija karakteristika Al-Cu legura sa višim udjelom bakra je njihova neosjetljivost na nečistoće no isto tako imaju i vrlo malu čvrstoću te samo prosječnu livljivost. Legure sa još višim udjelom bakra (9 do 11%) pogodne su za uporabu u avionskoj i automobilske industriji zbog dobre čvrstoće pri povišenim temperaturama i otpornosti na trošenje [7].

- *Al-Si-Cu legure*

Aluminijske legure sa silicijem i bakrom kao legirnim elementima najupotrebljavanije su lijevačke aluminijske legure. Udio pojedinog konstituenta varira pa je kod nekih legura zastupljeniji bakar, a kod nekih silicij, ovisno o željenim svojstvima. Bakar pridonosi povećanju čvrstoće, dok silicij pridonosi povećanoj livljivosti te otpornosti na tople pukotine. Iz tog se razloga legure sa višim udjelom silicija često koriste za kompleksnije odljeve te za tehnologije lijevanja u kokile te lijevanje pod visokim tlakom. Al-Si-Cu legure sa 3 do 4% Cu su toplinski obradive te im se u

svrhu povećanja učinka toplinske obrade često dodaje i magnezij. Mnoge nadeutektičke legure (12 do 30% Si) sadrže i bakar. Primarna faza silicija daje izvrsnu otpornost na koroziju, a bakar pridonosi povećanju čvrstoće pri povišenim temperaturama. Zbog toga se često primjenjuju za izradu blokova motora i klipova u automobilske industriji [7].

- ***Al-Si legure***

Legure aluminija sa silicijem koje nemaju bakar u sastavu koriste se kada su potrebne dobra livljivost i otpornost na koroziju. Legure sa manje od 12% Si nazivaju se podeutektičkim, one sa otprilike 12% Si eutektičkim, a legure sa više od 12% Si nadeutektičkim legurama. Za lijevanje se najčešće koriste legure eutektičkog sastava, sa 11 do 13% Si. One imaju dobru livljivost te se upotrebljavaju za izradu složenih odljevaka s tankim stjenkama kod kojih treba izbjegavati lokalna zadebljanja [2]. Čvrstoća te duktilnost ovih legura, naročito onih sa povišenim udjelom silicija, mogu se značajno povećati modifikacijom Al-Si eutektika [7].

- ***Al-Si-Mg legure***

Dodavanjem magnezija Al-Si legurama dobiva se skupina legura sa izvrsnim ljevačkim svojstvima te izvrsnim svojstvima nakon toplinske obrade. Postiže se i odlična otpornost na koroziju te malen koeficijent toplinske ekspanzije. Iako ne mogu postići čvrstoće kao neke od Al-Cu ili Al-Si-Cu legura, moguće je postići vrlo visoke vrijednosti čvrstoće. Čvrstoća ovih legura može se dodatno povećati dodatkom berilija [7].

- ***Al-Mg legure***

Visoka otpornost na koroziju, naročito u morskoj vodi, glavna je prednost ovih legura. Dobro se obrađuju rezanjem, imaju visoka mehanička svojstva te se ne lijepe na površinu tlačnog klipa prilikom lijevanja pod visokim tlakom. Zbog velike sklonosti oksidaciji u rastaljenom stanju potrebo je posebno pažljivo izvoditi operacije taljenja i ulijevanja taljevine. To je naročito bitno jer se Al-Mg legure često koriste za odljevke koji zahtijevaju poliranje površine prilikom čega su oksidni uključci izrazito nepoželjni. Relativno loša livljivost te sklonost oksidaciji u rastaljenom stanju otežavaju rukovanje ovim materijalom čime raste i cijena konačnih odljevaka [2][7].

U tablici 4.1 prikazana su mehanička i fizikalna svojstva nekih aluminijskih legura za tlačni lijev.

Tablica 4.1, Svojstva aluminijskih legura za tlačni lijev [8]

Standard	Oznaka legure						
ANSI AA	A360.0	A380.0	383.0	384.0	390.0	A413.0	518.0
ISO	Al-Si10Mg	Al-Si8Cu3Fe	-	Al-Si10Cu2Fe	-	Al-Si12Cu	-
EN	43100	46500	-	46100	-	44100	-
MEHANIČKA I FIZIKALNA SVOJSTVA							
Vlačna čvrstoća, N/mm ²	320	320	310	330	320	290	310
Granica razvlačenja, N/mm ²	170	160	150	170	250	130	190
Istezljivost, %	3,5	3,5	3,5	2,5	<1	3,5	5
Gustoća, g/cm ³	2,63	2,71	2,74	2,82	2,73	2,66	2,57
Interval taljenja, °C	557...596	540...595	516... 582	516...582	510... 650	574... 582	535... 621
Koeficijent toplinske vodljivosti, W/mK	113	96,2	96,2	96,2	134	121	96,2

4.2. Cinkove legure

Legure cinka imaju dobra ljevačka svojstva te se od njih mogu uspješno lijevati složeni i tankostijenih odljevci. Manje su otporne na koroziju od legura bakra te se upotrebljavaju za nanošenje zaštitnih, dekorativnih i ojačavajućih prevlaka. Legure cinka najviše se upotrebljavaju a automobilske industriji, dobro se poliraju i prihvaćaju sve galvanske prevlake [2].

Najkorištenije cinkove legure za visokotlačni lijev su legure ZnAl4 te ZnAl4Cu1. Te legure spadaju u tzv. „Zamak“ skupinu cinkovih legura, koje u sastavu imaju cink, aluminij, magnezij i bakar. Legure iz ove skupine nominalno imaju 4% aluminija u sastavu te malen udio magnezija koji se dodaje kako bi se povećala čvrstoća te otpornost na interkristalnu koroziju. Osim te skupine legura pojavila se i relativno nova skupina tzv. „ZA“ legura, od kojih se legure Z-8, ZA-12 te ZA-27 koriste za tlačno lijevanje. Legure iz „ZA“ skupine legura sadrže znatno veći udio aluminija nego one iz „Zamak“ skupine. U odnosu na legure iz „Zamak“ skupine, „ZA“ legure karakterizira veća čvrstoća, bolja otpornost na trošenje, bolja otpornost na puzanje te manja gustoća. Kemijski sastavi i mehanička svojstva nekih od legura iz navedenih skupina prikazuje tablica 4.2 [8].

Tablica 4.2, Svojstva cinkovih legura za tlačni lijev [8]

Oznaka	Kemijski sastav, %							Mehanička svojstva			
	Al	Mg	Cu	Fe	Pb	Cd	Sn	Vlačna čvrstoća, N/mm ²	Granica razvlačenja, N/mm ²	Istezljivost, %	Tvrdoća. HB
ZnAl4	3,5...4,3	0,02...0,05	0,25	0,10	0,005	0,004	0,003	283	221	10	82
ZnAl4Cu1	3,5...4,3	0,03...0,08	0,75...1,25	0,10	0,005	0,004	0,003	328	269	7	91
ZA-8	8...8,8	0,015...0,03	0,8...1,3	0,075	0,006	0,006	0,003	372	296	10	106
ZA-12	10,5...11,5	0,015...0,030	0,5...1,2	0,075	0,006	0,006	0,003	400	331	7	105

4.3. Magnezijeve legure

Legure magnezija za lijevanje pod visokim tlakom u odnosu na aluminijske legure karakterizira manja gustoća (1,8 g/cm³), visoka čvrstoća te dobra obradivost rezanjem. Čisti magnezij se tlačno ne lijeva zbog niskih mehaničkih svojstava te svojstva da eksplozivno reagira s kisikom iz zraka pri povišenim temperaturama. Za visokotlačni lijev upotrebljavaju se legure magnezija sa aluminijem, cinkom i manganom. Ove legure imaju neka negativna svojstva kao što su mala istezljivost, mala čvrstoća na povišenim temperaturama, snižena livljivost te velik afinitet prema kisiku [2].

Legura MgAl9Zn je najupotrebljavanija legura magnezija za visokotlačno lijevanje. Neke od njenih prednosti su izvrsna otpornost na koroziju, izvrsna livljivost i visoka čvrstoća. Otpornost na koroziju postiže se strogom kontrolom udjela triju metalnih komponenti: željeza, ugljika i nikla. Legure MgAl6Mn, MgAl5Mn te MgAl2Mn primjenjuju se u slučajevima kada se zahtjeva visoka istezljivost, žilavost te otpornost na udarce. Uz sve to karakterizira ih i visoka čvrstoća te otpornost na koroziju [8]. Kemijski sastav i mehanička svojstva spomenutih legura prikazuje tablica 4.3.

Tablica 4.3, Svojstva magnezijevi legura za tlačni lijev [8]

Oznaka	Kemijski sastav, %							Mehanička svojstva			
	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	Vlačna čvrstoća, N/mm ²	Granica razvlačenja, N/mm ²	Istezljivost, %	Tvrdoća. HB
MgAl9Zn	8,3...9,7	0,35...1	0,15...0,5	0,1	0,005	0,03	0,002	230	160	3	75
MgAl6Mn	5,5...6,5	0,2	0,24...0,60	0,1	0,005	0,01	0,002	220	130	8	62
MgAl5Mn	4,4...5,5	0,2	0,26...0,6	0,1	0,004	0,01	0,002	220	120	10	57
MgAl2Mn	1,6...2,6	0,2	0,33...0,7	0,1	0,004	0,001	0,002	185	105	12	47

4.4. Bakrove legure

Od svih legura za lijevanje pod visokim tlakom, legure bakra imaju najviša mehanička svojstva i najbolju otpornost na koroziju. Lijevaju se pri relativno visokim temperaturama (982 do 1066°C) što za posljedicu ima smanjeni vijek trajanja kalupa u odnosu na druge legure. Legure bakra su u pravilu zahtjevnija za obradu odvajanjem čestica u odnosu na ostale legure za visokotlačno lijevanje, iako se legiranjem mogu postići zadovoljavajuća svojstva i na tom području [8].

Legura C85800 je legura opće namjene koju karakterizira niska cijena te dobra obradivost odvajanjem čestica. Legura C87800 nudi najviša mehanička svojstva, tvrdoću te otpornost na trošenje od svih legura bakra za visokotlačno lijevanje, no najzahtjevnija je za lijevanje.

Uglavnom se upotrebljava samo kad su na odljevak postavljeni zahtjevi visoke čvrstoće i dobre otpornosti na trošenje [8]. U tablici 4.4 prikazana su svojstva nekih bakrovih legura za tlačni lijev.

Tablica 4.4, Svojstva bakrovih legura za tlačni lijev [8]

Oznaka (prema ANSI/AA)	Kemijski sastav, %								Mehanička svojstva			
	Cu	Sn	Pb	Zn	Fe	Al	Mn	Ni	Vlačna čvrstoća, N/mm ²	Granica razvlačenja, N/mm ²	Istezljivost, %	Tvrdoća. HB
C85800	57	1,5	1,5	31...41	0,5	0,55	0,25	0,5	379	207	15	60
C86500	55...60	1	0,4	36...42	0,4...2	0,5...1,5	0,1...1,5	1	489	193	30	100
C87800	80...84,2	0,25	0,09	12...16	0,15	0,15	0,15	0,2	586	344	25	90
C99700	54	1	2	19...25	1	0,5...3	11...15	4...6	448	186	15	125

5. TEHNOLOŠKI PARAMETRI TLAČNOG LIJEVANJA

Na svojstva odljevka kod visokotlačnog lijevanja može se utjecati pažljivim podešavanjem parametara. Na kvalitetu odljevka najveći utjecaj imaju parametri :

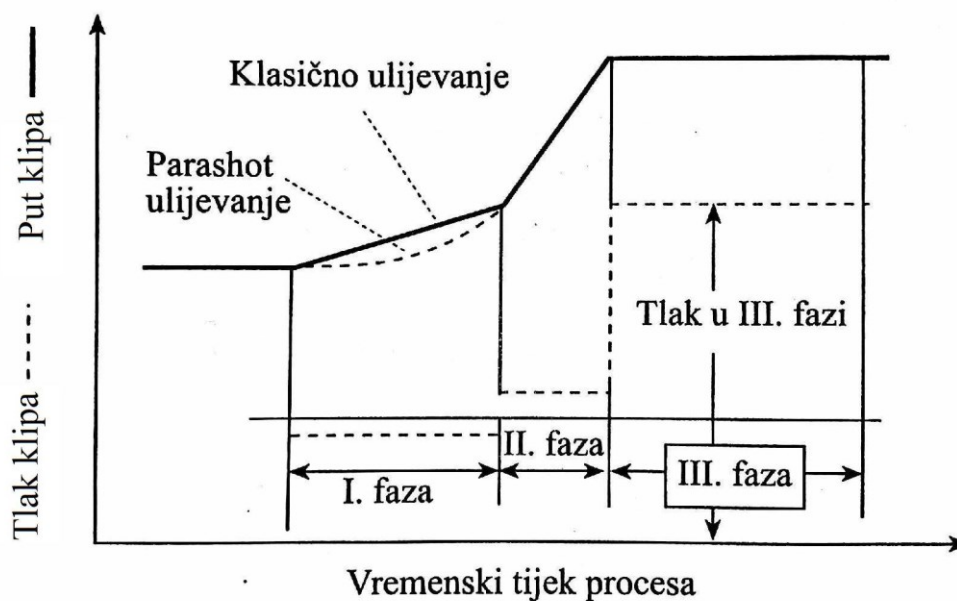
- legura za lijevanje,
- alata za lijevanje,
- tlačnog stroja [9].

Da bi proizvod bio kvalitetan, svi ti parametri tijekom proizvodnje moraju biti unutar granica koje omogućuju dobivanje potrebne kvalitete što se tiče dimenzija, oblika, mehaničkih i fizikalnih svojstava odljevka [9].

Kretanje klipa prilikom procesa lijevanja kod suvremenih horizontalnih visokotlačnih strojeva za lijevanje pod tlakom može se podijeliti u sljedeće tri faze:

- **I. faza:** rastaljeni metal mora polagano doći do uljevnog ušća odljevka. U ovoj je fazi potrebno istisnuti zrak iz tlačne komore pa se klip giba relativno malim brzinama.
- **II. faza:** rastaljeni metal mora kroz ušće u što kraćem vremenu popuniti kalupnu šupljinu.
- **III. faza:** dodatno se povećava tlak na rastaljeni metal, čime se smanjuje poroznost i povećavaju mehanička svojstva odljevka [9].

Prva faza naziva se još i „spora faza“ (e. slow shot), a druga faza „brza faza“ (e. fast shot) [10]. Na slici 5.1 prikazane su promjene puta i tlaka u vremenu tijekom jednog ciklusa lijevanja.



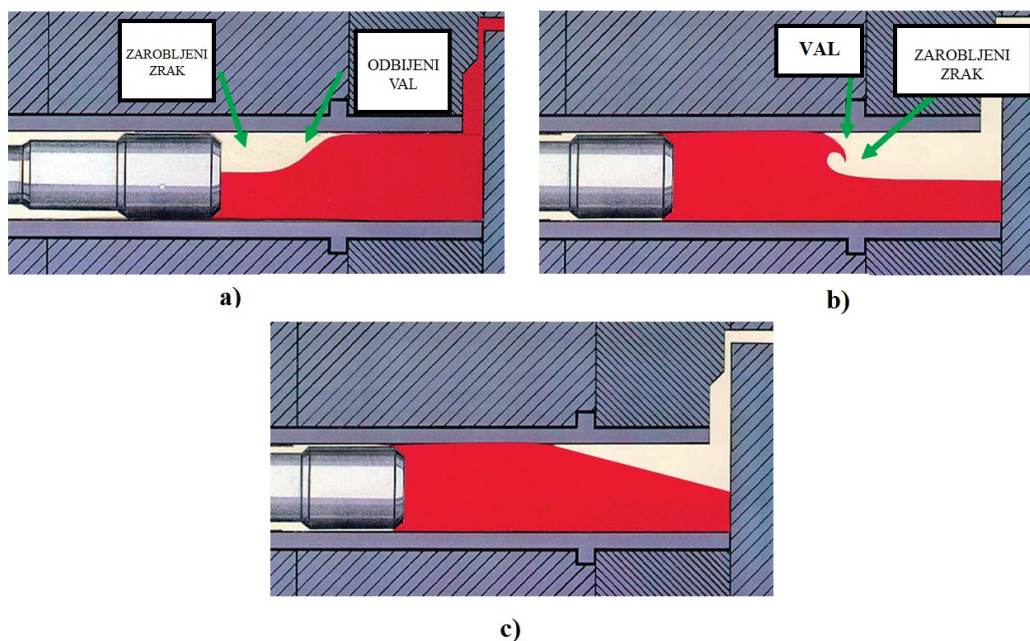
Slika 5.1, Shematski prikaz puta i tlaka klipa po fazama [9]

5.1. Brzina klipa u prvoj fazi

U prvoj fazi brzina tlačnog klipa kreće se od 0,05 do 0,5 m/s [2]. U ovoj fazi zahtijevaju se male brzine gibanja klipa kako ne bi došlo do formiranja udarnog vala taljevine uslijed kojeg može doći do zarobljavanja zraka. Tako zarobljeni zrak taljevina prenese sa sobom i odnese ga u kalupnu šuplinu. Taljevina obično zauzima svega 30 do 50% obujma tlačne komore, a ostatak je ispunjen zrakom. Iako se sabije zbog tlaka u metalu, velike količine zarobljenog zraka mogu izazvati velike probleme kod odljevaka [10]. Zrak zarobljen usred prve faze utiskivanja metala jedan je od glavnih uzroka pojave poroznosti u visokotlačnim odljevcima. Treba imati na umu i da je brzina kretanja klipa dovoljno mala kako ne bi došlo do prskanja taljevine kroz otvor za ulijevanje prilikom prolaska klipa. Problem zarobljavanja zraka tokom spore faze rješava se ulijevanjem *Parashot* načinom [9]. Pri ulijevanju *Parashot* načinom brzina stapa se postupno povećava, tj. nema formiranja udarnog vala jer brzina stapa slijedi brzinu taljevine kako prikazuje slika 5.2c.

Brzina klipa pri kojoj ne dolazi do formiranja vala i time zarobljavanja zraka u tlačnoj komori predmet je proučavanja mnogih radova. Prema [12] eksperimentalnim razmatranjima došlo se do saznanja o postojanju kritične brzine klipa. Gibanjem klipa brzinom manjom od kritične tlačna komora ne ispunjava se taljevinom po čitavoj visini te se taljevina odbija te teče nazad prema

klipu pri čemu dolazi do zarobljavanja zraka, kako je prikazano na slici 5.2a. U slučaju gibanja klipa brzinama većim od kritične taljevina udara o unutarnju stjenku tlačne komore te dolazi do zarobljavanja zraka prebacivanjem kreste vala, kako je prikazano na slici 5.2b. Slika 5.2c prikazuje oblik vala postignut kretanjem klipa kritičnom brzinom, bez zarobljavanja zraka.



Slika 5.2, Formiranje vala tokom spore faze [11]

Na formiranje vala i zarobljavanje zraka unutar tlačne komore osim brzine klipa utjecaj imaju i popunjenost tlačne komore taljevinom te visina, duljina te oblik poprečnog presjeka tlačne komore [12]. Akceleracija klipa ima utjecaj na oblik vala. Smanjenjem akceleracije val postaje stabilniji, no premala akceleracija može uzrokovati otkidanje vala te zarobljavanje zraka. Vrijednost kritične brzine pada s povećanjem popunjenosti tlačne komore taljevinom. Do stvaranja vala i zarobljavanja zraka lakše će doći u slučaju manje količine taljevine ($<30\%$) u tlačnoj komori zbog čega manje količine taljevine u tlačnoj komori nisu preporučene. Kod omjera visine i dužine tlačne komore od 0,15, što je uobičajeno za mnoge strojeve, brzinu gibanja klipa treba pažljivo odrediti jer postoji velika mogućnost otkidanja vala. Za veće omjere duljine i visine tlačne komore mogućnost otkidanja vala se smanjuje [12].

5.2. Brzina klipa u drugoj fazi

Brzina klipa u drugoj fazi ovisi o konstrukciji odljevka, debljini stjenke odljevka te sili zatvaranja stroja. Kod strojeva za visokotlačni lijev brzina tlačnog klipa kreće se do 8 m/s. Na temelju brzine taljevine na ušćima, prema konstrukciji uljevnog kanala, načinu punjenja odljevka te debljini stjenki odljevka namješta se brzina tlačnog klipa [9]. Tablica 5.1 prikazuje preporučeno vrijeme punjenja kalupa s obzirom na srednje debljine stjenke odljevka, a tablica 5.2 prikazuje orijentacijske vrijednosti brzine taljevine u ušću.

Tablica 5.1, Preporučeno vrijeme punjenja kalupa s obzirom na srednje debljine stjenke odljevka [2]

Srednja debljina stjenke odljevka, mm	Vrijeme punjenja kalupa. s
1,5	0,01...0,03
1,8	0,02...0,04
2,0	0,02...0,06
2,3	0,03...0,07
2,5	0,04...0,09
3,0	0,05...0,10
3,8	0,05...0,12
5,0	0,06...0,20
6,4	0,08...0,30

Tablica 5.2, Orijentacijske vrijednosti brzine taljevine u ušću [2]

Legure	Brzina, m/s	Napomena
Cinka	30...50	srednja vrijednost
	40	
Aluminija	20...60	kod nevakuumiranih tlačnih kalupa kod vakuumiranih tlačnih kalupa
	15...30	
Magnezija	40...90	srednja vrijednost
	40...60	
Bakra	20...50	srednja vrijednost
	30	

Kako bi se odredila brzina tlačnog klipa treba poznavati kinematičku vezu između kretanja klipa u tlačnoj komori i strujanja taljevine u uljevnom sustavu. Za određivanje te ovisnosti može se primijeniti jednačina kontinuiteta:

$$v_k \cdot A_k = v_u \cdot A_u \quad (5.1)$$

gdje je:

v_k – brzina klipa, m/s

A_k – površina klipa, m²

v_u – brzina taline u ušću, m/s

A_u – presjek ušća, m²

Bernoullijeva jednačina za stacionarno strujanje glasi:

$$\frac{\rho v_u^2}{2} + \rho g h_u + p_u = \frac{\rho v_k^2}{2} + \rho g h_k + p_k \quad (5.2)$$

gdje je:

ρ – gustoća taljevine, kg/m³

g – ubrzanje sile teže, $g = 9,81$ m/s

h_u – visina taline u ušću, m

h_k – visina taline u tlačnoj komori, m

p_u – tlak u ušću, Pa

p_k – tlak u tlačnoj komori, Pa.

Visine h_u i h_k približno su jednake u prvom trenutku. Tlak u ušću p_u jednak je atmosferskom tlaku za sve dobro odzračene kalupe. Brzina klipa v_k je mala u odnosu na brzinu taljevine v_u u ušću te se može zanemariti. S navedenim uvjetima uzetim u obzir dolazi se do izraza za tlak u tlačnoj komori:

$$p_k = \frac{1}{2} \cdot v_u^2 \cdot \rho \quad (5.3)$$

Gubitci energije prilikom strujanja taline uzimaju se u obzir uvođenjem koeficijenta η , pa izraz za stvarnu brzinu strujanja taline u ušću glasi:

$$v_u = \eta \sqrt{\frac{2 \cdot p_k}{\rho}} \quad (5.4)$$

gdje je:

η – koeficijent učinka taline s obzirom na otpor strujanju (manji je od 1).

Pravilan izbor brzine druge faze iznimno je bitan za tehnološki proces i konačna svojstva odljevka. Sa stajališta tlačnog stroja i alata poželjnije su manje brzine tlačnog klipa u drugoj fazi radi manjeg trošenja stroja i alata. Kod tankostijenih odljevaka primjena velikih brzina je neophodna kako bi se postigla željena kvaliteta površine i potpuna dolivenost. Kod brzina manjih od optimalne nastaje nedolivenost odljevka, hladne zone te je moguća poroznost odljevka [9]. Veća brzina lijevanja u drugoj fazi zbog većeg trenja dovodi do lijepljenja taljevine na ušće odljevka, neravnomjerne popune alata i većeg dinamičkog tlaka na alat, što skraćuje vijek trajanja alata i tlačnog stroja i smanjuje kvalitetu odljevka [13]. Uslijed veće brzine taljevine dolazi do povećanog dinamičkog tlaka taljevine na alat, što može djelomično otvoriti alat i prouzrokovati opasno prskanje taline izvan alata [9;13].

U radovima [9] i [13] ispitivan je utjecaj brzine tlačnog klipa u drugoj fazi na mehanička i fizikalna svojstva odljevka. Ispitivanjem u [13] ustanovljeno je da postoji čvrsta povezanost između vlačne čvrstoće odljevaka i brzine druge faze. Pokazalo se da se s povećanjem brzine druge faze povećava i čvrstoća odljevaka. Iz rezultata mjerenja danih u [9] došlo se do zaključka da povećanjem brzine druge faze povećava masa i gustoća, odnosno smanjuje poroznost odljevka. Dakle, prema [9] i [13], brzina u drugoj fazi ima bitan utjecaj na kvalitetu površine odljevka, njihovu masu i gustoću, a time i poroznost. Optimalna brzina lijevanja je najveća brzina druge faze koja omogućuje lijevanje odljevaka potrebne kvalitete [9].

5.3. Tlak treće faze

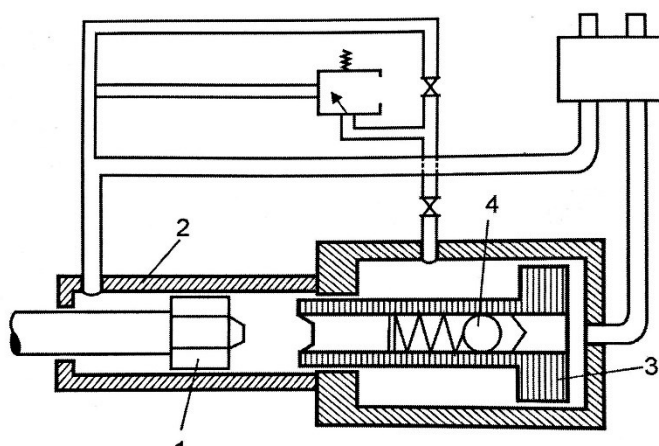
Treća faza nastupa nakon što je kalupna šupljina u potpunosti popunjena taljevinom. U ovoj fazi dolazi do kontroliranog povećanja tlaka na taljevinu nakon popunjavanja kalupne šupljine i zaustavljanja tlačnog klipa. Tlak u trećoj fazi zavisi od vrste odljevka, vrste legure i sile zatvaranja stroja. Tablica 5.3 prikazuje preporučene tlakove lijevanja prema vrsti odljevka i vrsti legure. Po završetku punjenja kalupne šupljine taljevinom dolazi do naglog zaustavljanja tlačnog klipa te porasta tlaka na pogonskom klipu. Prevelik porast tlaka može dovesti do djelomičnog otvaranja kalupa i pojave srha. Suvremeni tlačni strojevi imaju mogućnost podešavanja akceleracije klipa u određenom položaju pa zaustavljanje klipa može biti postepenije te se navedeni porast tlaka može preciznije podesiti.

Tablica 5.3, Tlak lijevanja za različite legure i vrste odljevaka [2]

Legure	Tlak lijevanja, MPa			
	Aluminija	Cinka	Magnezija	Bakra
Standardni odljevci	20...40	10...20	20...40	30...40
Tehnički odljevci	40...60	20...30	40...60	40...50
Nepropusni odljevci	80...100	25...40	80...100	80...150

Veći tlak lijevanja daje bolja mehanička i tehnološka svojstva odljevka, manju poroznost, bolju kvalitetu površine odljevka, ali se time više opterećuje tlačni stroj. Maksimalni ljevni tlak je limitiran veličinom odljevka i silom zatvaranja tlačnog stroja. Ljevni tlak pomnožen projiciranom površinom alata u smjeru lijevanja čini silu otvaranja tlačnog stroja koja nastoji otvoriti alat pri lijevanju. Ta sila mora biti 20 do 30 % manja od sile zatvaranja stroja. Vrijeme početka treće faze zavisi od temperature taljevine, tlaka multiplikacije, površine odljevka itd. Vrijeme početka treće faze mora biti od 0,1 do 0,6 sekundi poslije popune alata rastaljenim materijalom. Ono se na stroju može namjestiti potencijetrom na vremenskom releju ili upisati u program kod novijih strojeva [9]. Ukoliko se povišenje tlaka primjeni prerano može doći do otvaranja kalupa i pojave srha. Stoga je poželjno da se materijal djelomično skrutne prije primjene visokog tlaka. Vrijeme početka treće faze najčešće se određuje eksperimentiranjem na stroju na način da se vrijeme primjene tlaka nakon popunjavanja kalupa inkrementalno povećava sve dok se ne dobiju odljevci bez srha [14].

Povišenje tlaka postiže korištenjem specijalnih izvedbi hidrauličkog klipa (tzv. multiplikatora) ili korištenjem hidrauličkih akumulatora. Multiplikatorski cilindar prikazuje slika 5.3. U multiplikatorskom cilindru nalaze se dva klipa, od kojih je manji klip pogonski. Za vrijeme lijevanja povratni ventil je otvoren te hidrauličko ulje pogoni klip (1). Nakon što se kalupna šupljina popuni i tlačni klip zaustavi dolazi do porasta tlaka u prostoru iza klipa (1) uslijed čega se povratni ventil zatvara te hidrauličko ulje djeluje na površinu većeg klipa (3) čime se povisuje tlak u ulju iza pogonskog klipa, a time i tlak pogonskog klipa na taljevinu [2]. Uobičajeni omjer tlaka multiplikacije, naspram tlaka korištenog za ulijevanje taljevine u kalupnu šupljinu je 3:1 [14].

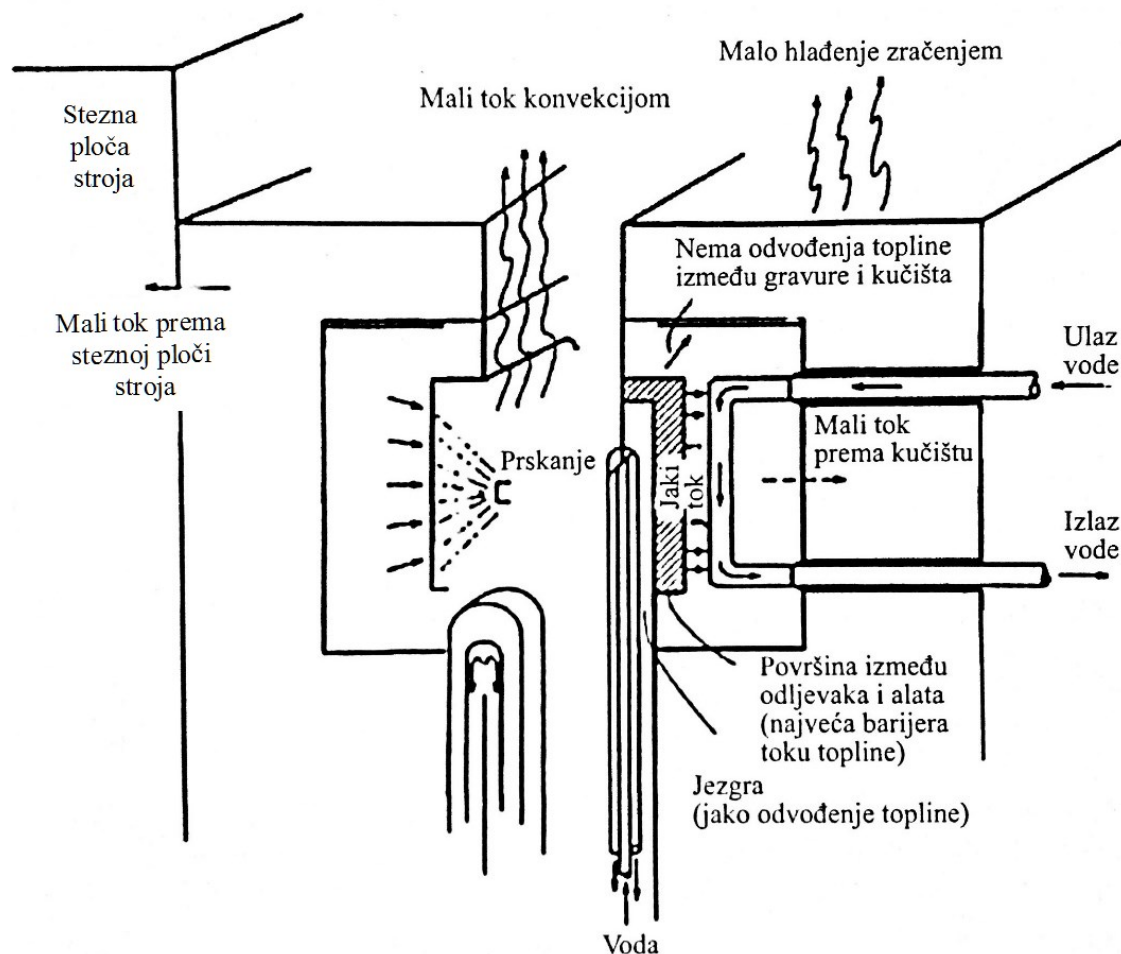


1-pogonski klip, 2-hidraulički cilindar,
3-klip multiplikatora, 4-povratni ventil

Slika 5.3, Multiplikator [2]

5.4. Temperiranje kalupa

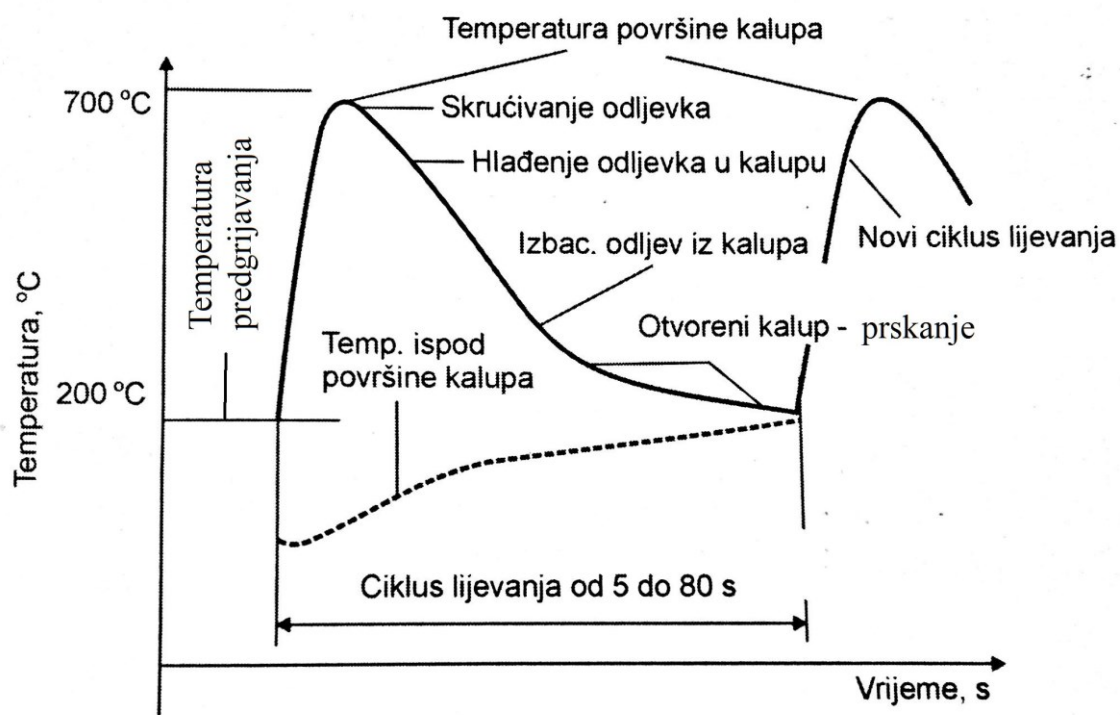
Temperatura kalupa parametar je od iznimne važnosti za postupak tlačnog lijevanja. Pravilan dovod i odvod topline u kalupu ima utjecaj na kvalitetu odljevka, proizvodnost te vijek trajanja kalupa. Željeni temperaturni režim kalupa osigurava se pomoću kanala za temperiranje kroz koji teče voda koja služi kao medij za odvođenje topline. Kanali za temperiranje mogu se koristiti i za zagrijavanje određenih područja kalupa kod kojih postoji opasnost od preranog skrućivanja, u kojem se slučaju kao medij koristi ugrijano ulje. Dakle kalup za tlačno lijevanje ima funkciju izmjenjivača topline te je njegova zadaća osigurati kontrolirani odvod topline od taljevine u vremenu od ulaska taljevine u kalup do izbacivanja skrućenog odljevka iz kalupa. Toplina se od taljevine odvodi mehanizmima kondukcije, konvekcije te zračenja, kako je prikazano na slici 5.4. Kontrola toplinskog toka postiže se pravilnim postavljanjem kanala za temperiranje. Određivanje položaja kanala često je otežano kompleksnom geometrijom odljevka [14]. Veći efekti hlađenja postižu se ako su kanali ugrađeni što bliže kalupne šupljine, a ne na periferiji kalupa [2]. Parametri koji utječu na učinkovitost sustava za odvođenje topline su volumni protok medija, temperatura i tlak medija te taloženje kamenca unutar kanala. Otklanjanje naslaga kamenca iz kanala dio je preventivnih radnji održavanja alata. Osim kanalima za temperiranje odvođenje topline vrlo često vrši se i prskanjem, kako prikazuje slika 5.4. Korištenje prskanja ima štetan učinak na alat, pa njihovo korištenje predstavlja kompromis između vijeka trajanja alata i povećanja proizvodnosti (smanjenja trajanja ciklusa lijevanja) [4].



Slika 5.4, Mehanizmi prijenosa topline u kalupu [10]

Iznimno je bitno da se prije početka lijevanja kalup zagrije na potrebnu radnu temperaturu kako bi se smanjilo toplinsko naprezanje te povećao vijek trajanja alata. Grijanjem alata smanjuje se škart odljevka kao i eventualno zadržavanje odljevka u alatu zbog moguće pojave poroznosti i nedolivenosti odljevka. Slika 5.5 prikazuje raspored temperatura kalupa tijekom ciklusa lijevanja. Temperatura površine kalupa, koja je u izravnom dodiru s taljevinom, znatno je viša od temperature kalupa ispod površine. Vidljivo je da se temperatura kalupa tokom ciklusa značajno mijenja što uzrokuje njegovo stalno skupljanje i širenje. Početno zagrijavanje alata može se izvršiti plinom, električnim grijačima ili, kao što je već navedeno, putem kanala za temperiranje koristeći zagrijano ulje ili vodu [9]. Orijentacijske vrijednosti radne temperature kalupa kreću se od 120°C do 350°C, ovisno o vrsti legure koja se lijeva [2;9].

Kako alat za tlačno lijevanje ima funkciju izmjenjivača topline te je izložen toplinskim naprezanjima postoje određeni zahtjevi koje materijal za izradu alata za tlačno lijevanje mora ispuniti. Alatni čelici koji se često upotrebljavaju u izradi kalupa za lijevanje tlačnog lijeva moraju imati visoke pokazatelje udarne žilavosti pri povišenim temperaturama, visoku čvrstoću, otpornost na razaranje kalupne šupljine taljevinom, postojanost prema toplinskom umoru, sposobnost očuvanja prvotnih dimenzija te male deformacije u procesu toplinske obrade [2].



Slika 5.5, Raspored temperatura kalupa tijekom ciklusa lijevanja [2]

6. GREŠKE U TLAČNIM ODLJEVCIMA

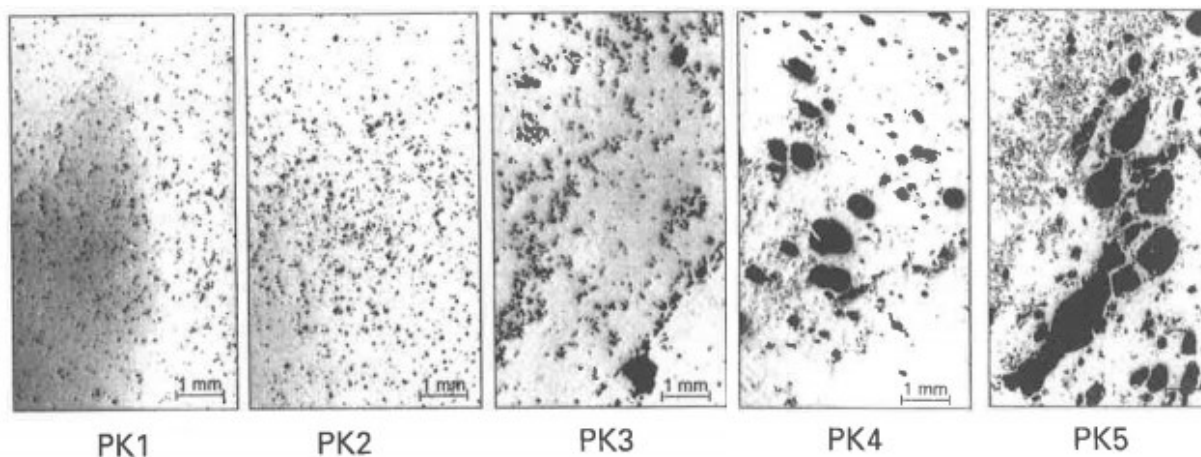
U tlačno lijevanim odljercima vrlo se često pojavljuju greške. Generalno se te greške mogu podijeliti u četiri osnovne skupine: greške dimenzija odljevaka, unutarnje greške, greške površine te greške koje smanjuju mehanička svojstva odljevka. Od unutarnjih grešaka za postupak tlačnog lijeva najznačajnija je pojava poroznosti u odljercima. Pojava grešaka u odljercima može se izbjeći ili smanjiti do željene mjere pažljivim odabirom tehnoloških parametara. Na formiranje grešaka u tlačnim odljercima utjecaj imaju parametri tlačnog stroja, odnosno tlačne komore i tlačnog klipa, parametri kalupa za lijevanje te parametri legure koja se lijeva [2]. Kako bi se učinkovito kontrolirala pojava grešaka u odljercima potrebno je imati neka saznanja o mehanizmima nastanka tih grešaka, kako bi se mogle poduzeti odgovarajuće mjere za njihovo sprečavanje. U nastavku su opisane neke od čestih tipova unutarnjih grešaka i grešaka površine kod tlačno lijevanih odljevaka.

6.1. Plinska poroznost

Poroznost odljevka može biti posljedica najčešće dvaju osnovnih uzroka: poroznost nastala stezanjem metala tijekom skrućivanja (promjene agregatnog stanja) i poroznost nastala zarobljavanjem plinova tijekom dotjecanja taline u kalupnu šupljinu. Prepoznavanje tipa poroznosti koja uzrokuje nekvalitetan odljevak presudno je za izbor pravilne strategije za njeno uklanjanje [10]. Pojava poroznosti na odljercima najčešća je u debelostijenim područjima, prijelazu s debljih na tanje stjenke i područjima u blizini ušća.

Plinsku poroznost karakteriziraju okrugle pore glatkih i sjajnih unutarnjih površina gotovo ravnomjerno raspodijeljene na velikom presjeku. Ne smiju se zamijeniti s usahlinskim porama hrapavih stjenki. Plinsku poroznost često je moguće uočiti tek nakon ispitivanja nepropusnosti odljevka ili nakon strojne obrade. Kod tlačnog lijeva zasad je gotovo nemoguće proizvesti odljevak bez poroznosti. Stoga prihvatljiv udio poroznosti u odljevku mora biti dogovoren između kupca i proizvođača pri postavljanju zahtjeva na kvalitetu odljevka. Jedan od načina da se to postigne je npr. određivanjem razreda poroznosti koristeći kvalifikacijski niz za procjenu poroznosti aluminijskog tlačnog lijeva, prikazanog na slici 6.1. Ako su utjecaji različitih poroznosti na mehanička svojstva poznati, traženi kriteriji kvalitete mogu se bolje uskladiti sa

zahtjevima koji se postavljaju na odljevke. Kod tlačnog lijeva se pomoću klasifikacijske slike poroznosti može jasno vidjeti i odrediti utjecaj različite poroznosti na mehanička svojstva [15].



Slika 6.1, Kvalifikacijski niz za procjenu poroznosti aluminijskog tlačnog lijeva [15]

Plinska poroznost u tlačnim odljercima može se pojaviti kao posljedica plinova nastalih kemijskom reakcijom taline sa premazom za alate ili klipove, plinova nastalih propuštanjem vode iz unutrašnjosti alata na površinu kalupne šupljine, plinova nastalih zarobljavanjem zraka tokom prve i druge faze ulijevanja taljevine. Klip se, kao pokretni dio, mora kontinuirano podmazivati kako ne bi došlo do njegovog zaribavanja za što se koriste razne vrste voskova ili ulja. Ukoliko doziranje premaza nije adekvatno može doći do doticaja taljevine i voska uslijed čega on djelomično izgara te tako oslobođeni plinovi mogu završiti u odljevku. Osim tlačnog klipa, premazuje se i površina ljevarskog kalupa za što se najčešće koriste vodene otopine silikonskih ulja. Problem nastaje ukoliko je koncentracija ulja previsoka te taljevina koja dolazi u kalupnu šupljinu reagira sa uljem pri čemu dolazi do oslobađanja plinova. Problem može nastati i ako je temperatura površine kalupa (slika 5.5) preniska pa vodeni dio otopine ne ispari ili ako dio vodene otopine ostane na ravnim površinama u alatu. Tada pri dodiru taline sa zaostalim kapljicama vode ona ispari, a nastala para ostaje zarobljena u odljevku. Do pojave plinske poroznosti u tlačno lijevanim odljercima može doći i ako nastane pukotina između vodenog kanala (kanala za temperiranje) i kalupne šupljine. Prilikom dodira sa rastaljenim metalom dolazi do isparavanja vode te vodena para ostaje zarobljena u taljevini [10].

Osim kemijskim reakcijama plinovi u taljevini mogu ostati zarobljeni i tokom brze faze, koja je opisana u poglavlju 5.1. Za eliminaciju plinova zarobljenih tokom brze faze potrebno je osigurati odgovarajuće kanale za odzračivanje. Klasični se odzračnici izrađuju s visinom 0,1 do 0,3 mm. Odzračne je kanale potrebno tako dimenzionirati da brzina plinova što ih talina tjera ispred sebe ne prelazi 70% brzine zvuka, odnosno 200 m/s kako ne bi došlo do stvaranje prevelikog otpora koji bi onemogućio izlazak plinova iz kalupne šupljine [10].

Kod tlačnog lijeva plinska poroznost može se izbjeći sljedećim mjerama:

- provjeriti odzračivanje kokile, otplinjavanje i obradu taljevine provoditi redovito,
- očistiti i ponovno premazati kokile, predebeli premazi usporavaju skrućivanje i prema tome pogoduju stvaranju plinske poroznosti,
- štedljivije i pažljivije provoditi podmazivanje stapa i kalupa,
- povećati tlak lijevanja i pravovremeno promijeniti tijekom hidrauličkih faza pri punjenju kalupa,
- izbjegavati otkidanje vala podešavanjem manje brzine gibanja klipa za vrijeme prve faze,
- neizbježna skretanja u uljevnom sustavu izvesti s dovoljno velikim polumjerima,
- povećati obujam preljeva [15].

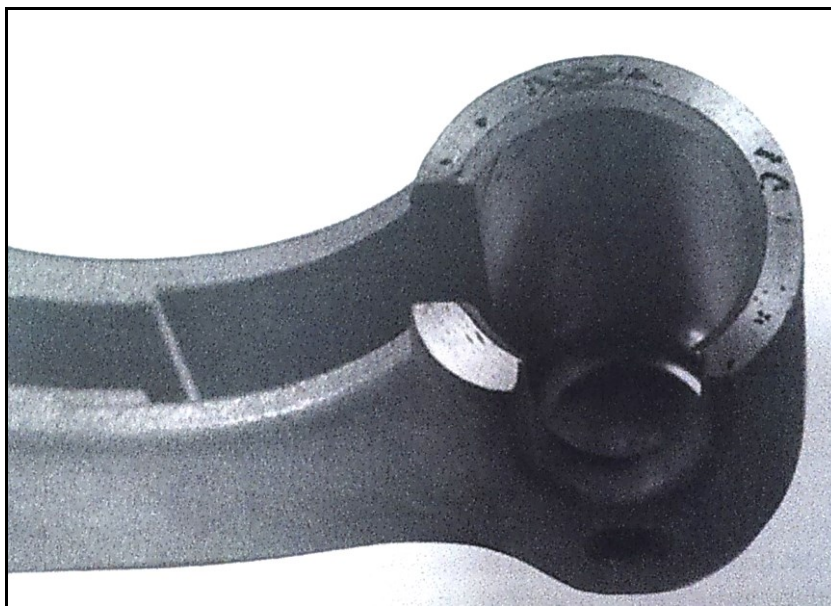
6.2. Oksidni uključci

Pojava oksidnih uključaka ne zavisi od postupka lijevanja te se pojavljuje u pješčanim, kokilnim i tlačnim odljevcima. Najčešće se pojavljuju u obliku tankih, filmolikih kožica. Netopljivi su i mjestimično prekidaju osnovnu strukturu. Legure koje sadrže veće udjele aluminija, silicija, magnezija i kroma naročito su sklone tvorbi oksidnih uključaka. U Al-Si legurama javljaju se uključci su obično promjera od 2 do 7,5 mm. Osim mješovitih oksida različita sastava i strukture sa Si, Mg, Na i Sr, u aluminijskim legurama vrlo su česta sljedeća dva oblika oksida:

- $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ – nastaje pri temperaturama od 750°C, mekan je i termički nestabilan te
- $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ – nastaje na temperaturama višim od 750°C te je termički stabilan [15].

Osim kemijskog sastava na stupanj oksidacije u praksi ponajprije zavisi od temperature i vremena na što treba obratiti pozornost kako pri taljenju tako pri održavanju topline. S porastom temperature raste sklonost oksidaciji. Smanjenom stvaranju oksidnih uključaka pridonosi dobro

odzračivanje kalupa [15]. Na slici 6.2. prikazan je tlačni aluminijski odljevak sa oksidnim uključcima.



Slika 6.2, Tlačni aluminijski odljevak s oksidnim uključcima [15]

6.3. Tvrdi mjesta

Tvrda mjesta su uključci ili faze koje se pojavljuju u aluminijskim legurama. Uključci nastali u mikrostrukturi ljevanih legura nepravilnog su oblika i velike tvrdoće koja uzrokuju velike probleme pri mehaničkoj obradi odljevaka, uz to oslabljuju strukturu i time pogoršavaju mehanička i dinamička svojstva odljevka. U tlačnim se odljevcima tvrdi oksidni uključci javljaju kao:

- fini, brazdasto smješteni oksidni slojevi,
- rahla oksidna gnijezda u obliku paralelno ili nepravilno poredanih oksidnih slojeva,
- kompaktni, zrnasti uključci korundnog tipa.

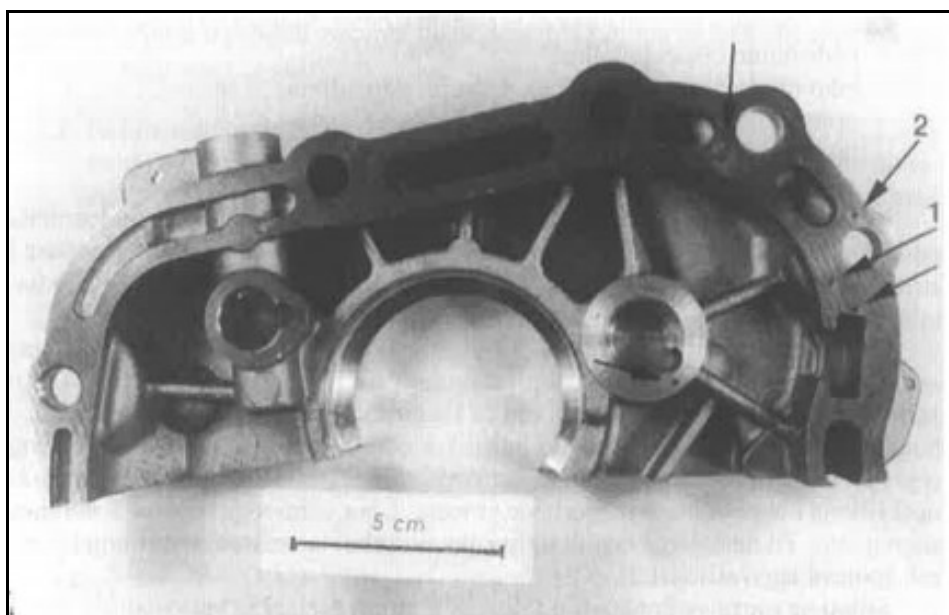
Tvrda se mjesta mogu podijeliti u dvije osnovne skupine: na metalne uključke i nemetalne uključke. Kod ljevanja Al legura mogu se naći unutar cijelog odljevka. Kod metalnih uključaka najčešće se radi o intermetalnim spojevima koji se izdvajaju iz taljevine u prvom redu kod slitina koje sadrže željezo i mangan. Za aluminijski tlačni ljev karakteristične su pojave sljedećih uključaka: Al_3Fe , Al_3Fe_2 , $\beta\text{-AlSiFe}$, Al_9FeSi_2 itd. Vrste i uzroci nastanka nemetalnih uključaka mogu biti vrlo različiti.

Sprečavanje nastanka metalnih uključaka može se ostvariti:

- održavanjem najniže temperature taljevine ovisno o sastavu taljevinu
- temeljitim čišćenjem kupelji,
- filtriranjem taljevine,
- ne dodavanjem krutih materijala u peć za održavanje topline [15].

Nastanak nemetalnih uključaka može se izbjeći mjerama čišćenja radi uklanjanja oksidnih sastojaka taljevine, Stupanj onečišćenja ovisi o sljedećim čimbenicima:

- sastavu legure,
- temperaturi i trajanju taljenja,
- miješanju kupelji (što je jače miješanje, jača je oksidacija)
- vrsti preći i grijanju – izravno grijane peći uzrokuju veću oksidaciju [15].



Slika 6.3, Aluminijski tlačni odljevka s tvrdim uključcima [15]

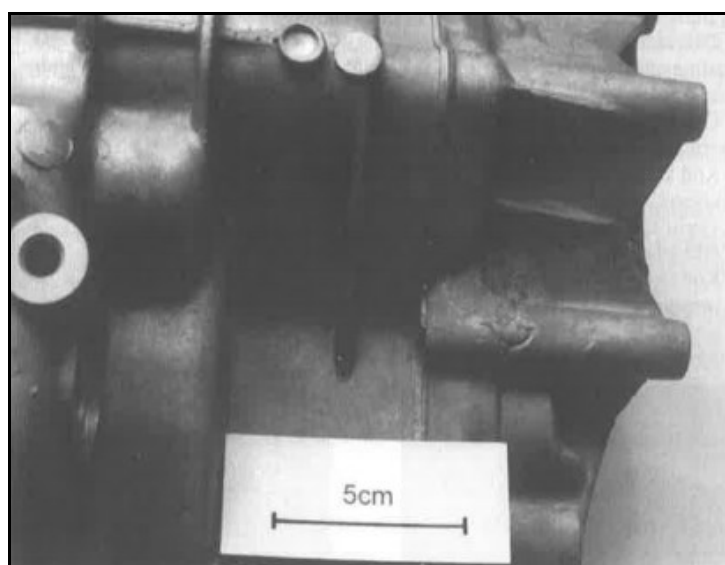
6.4. Hladni zavari

Hladni zavari površinska su pogreška koja se može pojaviti kod svih ljevačkih materijala neovisno od postupka lijevanja. Vidljiva je golim okom i vrlo često uzrokuje škart odljevka. Kod tlačnog lijeva označava se kao mjesto hladnog lijeva. Može nastati i u unutrašnjosti kao uključak hladnog zavora s vlastitom korom te je kao takva vidljiva tek nakon mehaničke obrade. Hladni se zavar pojavljuje pretežno na ravnim površinama i relativno je male debljine. Pritom može doći do

njegova odvajanja, tako da ostanu šupljine, nedolivena područja ili zaobljeni bridovi i preklapanja. Na tlačnom lijevu hladni zavar, odnosno mjesta hladnog lijeva, prepoznaju se po vrlo finim i vrlo tankim površinskim slojevima, kako je prikazano na slici 6.4 [15].

Hladni zavar nastaje zbog prijevremenog skrućivanja taline pri lijevanju što može biti posljedica preniske temperature ulijevanja, preniske temperature kalupa ili premale brzine ulijevanja. Kod tlačnog lijeva uzroci su najčešće poremećaji u gibanju tlačnog klipa ili neprikladan izbor točke prijelaza sa spore na brzu fazu punjenja kalupa te u nepovoljno oblikovanom ušću. Osim toga, mogu nastati i tako da se pojedina područja taljevine tijekom punjenja kalupa potpuno ili djelomično skrutnu zbog presporog punjenja kalupa, predugih puteva tečenja, premalih ušća itd. Mogu se dogoditi i nadslojavanja ako se skrutnuta kora odvoji pri punjenju kalupa pa talina uđe u rascjep između kore i stjenke kalupa. U posebnim uvjetima pri tlačnom lijevanju mogu na odljevku nastati linije tečenja [15].

Kako bi se izbjegla mjesta hladnog lijeva kod tlačnih odljevaka potrebno je održavati optimalne uvjete ulijevanja (povisiti temperaturu taline i kalupa). Vjerojatnost pojave može se smanjiti i tako da se poveća ušće, protok i prelivni obujam, zaoble uglovi i bridovi te podebljaju stjenke, poveća udio silicija u leguri, poveća tlak ulijevanja te promijeni vremenski tijek hidrauličkih faza tijekom punjenja kalupa, provjeri istrošenost tlačnog klipa i tlačne komore kako bi se spriječilo zaglavljivanje klipa tijekom punjenja kalupa [15].

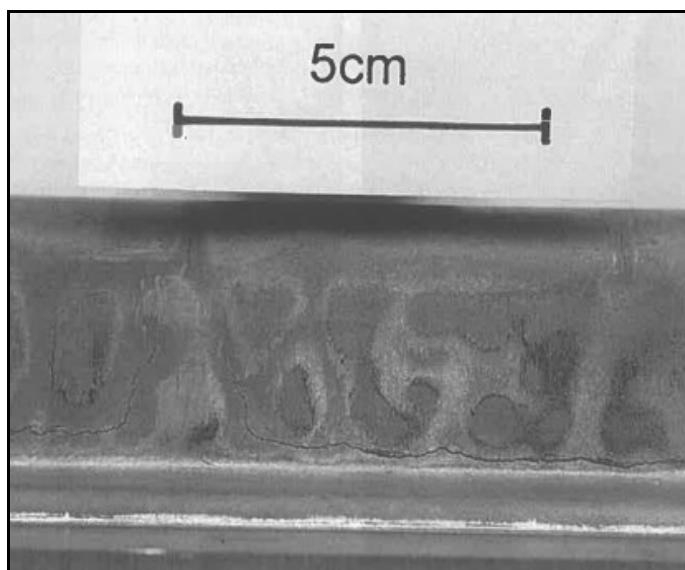


Slika 6.4, Hladni zavar [15]

Kako bi se izbjegla mjesta hladnog lijeva kod tlačnih odljevaka potrebno je održavati optimalne uvjete ulijevanja (povisiti temperaturu taline i kalupa). Vjerojatnost pojave može se smanjiti i tako da se poveća ušće, protok i preljevni obujam, zaoble uglovi i bridovi te podebljaju stjenke, poveća udio silicija u leguri, poveća tlak ulijevanja te promijeni vremenski tijek hidrauličkih faza tijekom punjenja kalupa, provjeri istrošenost tlačnog klipa i tlačne komore kako bi se spriječilo zaglavljivanje klipa tijekom punjenja kalupa [15].

6.5. Tople pukotine

Nastanku toplih pukotina skloniji su odljevci legura s velikim intervalom skrućivanja i malim udjelom komponenata niskog tališta (eutektika) koji se lijevaju u stalne kalupe, nego odljevci lijevani u pješčane kalupe, pod pretpostavkom istog konstrukcijskog oblika. Kako su naprezanja preduvjet za nastanak toplih pukotina u ovoj lijevačkoj pogrešci geometrijski oblik i konstrukcija kalupa igraju bitnu ulogu. Legure koje su osobito sklone nastanku toplih pukotina su legure iz skupina Al-Mg, Al-Zn-Mg te Al-Cu legura. Tople pukotine su međukristalna razdvajanja materijala. Pukotine koje se često protežu kroz cijeli presjek odljevka, teku uzduž primarno skrutnutih kristalita, a mjestimice mogu poprimiti razgranat oblik. Tako se u strukturi prijelomne površine može često uočiti fina dendritna struktura koja je zbog oksidacije ponajviše tamno obojena. Tople pukotine vidljive su golim okom, a valjano se dokazuju na metalografskom izbrusku [15]. Slika 6.5 prikazuje aluminijski tlačni odljevak s toplom pukotinom.



Slika 6.5, Tople pukotine [16]

6.6. Plinski mjehuri

Plinski mjehuri nastaju u prvom redu kod odljevaka koji se proizvode u pješčanim kalupima, ali je njihovo nastajanje moguće i kod tlačnog lijeva ako se tijekom skrućivanja slobodni plinovi poput vodika ili dušika odvoje zbog manje topljivosti. Ova je pogreška karakteristična po šupljinama sa zaobljenim, najčešće glatkim stjenkama, a obično zauzima velike površine (slika 6.6). Kod tlačnih odljevaka plinski mjehuri nastaju kao posljedica zahvaćenog i uvirtloženog zraka tijekom prve i druge faze punjenja kalupa, pa se ti mjehuri zbog posebnog uzroka njihovog nastanka ne mogu uspoređivati s vodikovom poroznošću. Dodatni problem stvaraju nemetalna onečišćenja koja mogu dovesti do povećanja viskoznosti taljevine čime se otežava otplinjavanje taljevine uslijed čega određena količina plina ostaje zarobljena u odljevku. I kod ove vrste pogreške tehnološki parametri prilikom ulijevanja taljevine u kalup igraju presudnu ulogu. Prevelike brzine gibanja klipa u prvoj fazi, praćene premalom brzinom taline na ušću te nedovoljan vremenski slijed hidrauličkih faza tijekom punjenja kalupa, nedovoljna ispunjenost tlačne komore taljevinom pridonose nastanku ove pogreške. Nagla skretanja te smanjenje brzine strujanja uzrokuju stvaranje vrtloga uslijed čega može doći do stvaranja zona prestanka strujanja u kojima nema gibanja taline pa se plinski mjehuri koncentriraju.



Slika 6.6, Plinski mjehuri [4]

7. SIMULACIJA TLAČNOG LIJEVA

U proizvodnom procesu postoje različiti parametri čijim se podešavanjem može značajno utjecati na kvalitetu gotovog proizvoda. Do optimalne kombinacije parametara za proizvodnju određenog proizvoda u realnim se proizvodnim uvjetima često dolazi metodom pokušaja i pogreške. Takav pristup zahtjeva opsežna ispitivanja, velike količine utrošenog vremena i sredstava te uvelike ovisi o iskustvu i vještinama radnika. Ljevarstvo, posebice tehnologija visokotlačnog lijeva, u današnje vrijeme pronalazi primjenu u mnogim industrijskim granama zahvaljujući velikoj produktivnosti procesa, mogućnosti proizvodnje odljevaka dobrih mehaničkih svojstava i komplicirane geometrije. Na visokotlačne odljevke postavljaju se visoki zahtjevi u pogledu kvalitete odljevka, dimenzijske točnosti, vremena potrebnog za razvoj proizvoda i sl. [17] Postojanje jake konkurencije prisiljava ljevače na smanjenje broja probnih lijevanja, smanjenje troškova proizvodnje, povećanje produktivnosti i učinkovitosti taljenja uz kontinuirano poboljšanje kvalitete odljevka. Pronalazak odgovora na takve zahtjeve i uvjete koje tržište diktira predstavlja velik problem u ljevačkoj industriji. Stoga je u posljednjih dvadeset godina došlo do velikih napredaka u stvaranju simulacijskih alata sa svrhom poboljšanja procesa proizvodnje te povećanja kvalitete odljevaka.

Korištenje simulacijskih alata donosi uštedu vremena i novaca skraćivanjem vremena potrebnog za razvoj proizvoda te količine upotrijebljenog materijala. U današnjoj ljevačkoj industriji simulacija lijevanja široko je prihvaćena kao važan alat u konstruiranju proizvoda, razvoju procesa lijevanja te poboljšavanju i rješavanju problema u ljevarstvu [2]. Tradicionalno se u industriji koriste i CAD/CAM tehnologije kao učinkovit alat za ostvarivanje konstrukcijskih rješenja u fazi razvoja proizvoda. No CAD/CAM alati za sebe ne pružaju mogućnosti analize tehnoloških parametara u ljevačkom procesu u svrhu predviđanja kvalitete odljevka. CAE (e. computer aided engineering) alati pružaju mogućnost optimiziranja proizvodnih parametara prije njihove praktične primjene. CAE simulacija je tehnološki najučinkovitiji i najisplativiji način za analizu, predviđanje te procjenu kvalitete odljevaka. Simulacija se odvija na principu rješavanja jednadžbi iz mehanike fluida i termodinamike (npr. Navier–Stokes-ova jednadžba, jednadžba kontinuiteta itd.) korištenjem metode konačnih elemenata (FEM) ili metode konačnih razlika (FDM) [17].

Provođenjem simulacije procesa lijevanja moguće je predvidjeti kretanje taljevine te skrućivanje taljevine unutar alata te dobiti potrebne informacije vezane uz kvalitetu odljevka i formiranje grešaka. Simulacijom procesa punjenja kalupa taljevinom te procesa skrućivanja odljevka moguće je dobiti informacije o :

- raspodjeli temperatura unutar kalupa,
- pojavi zarobljenog zraka u taljevini,
- slijedu punjenja kalupa,
- distribuciji brzine taljevine unutar kalupa,
- nepoželjnim tokovima taljevine tokom procesa punjenja kalupa,
- redoslijedu skrućivanja dijelova odljevka,
- učinkovitosti sustava za temperiranje kalupa,
- mjestima toplinskih čvorova,
- skupljanju materijala i pojavi poroznosti itd. [17]

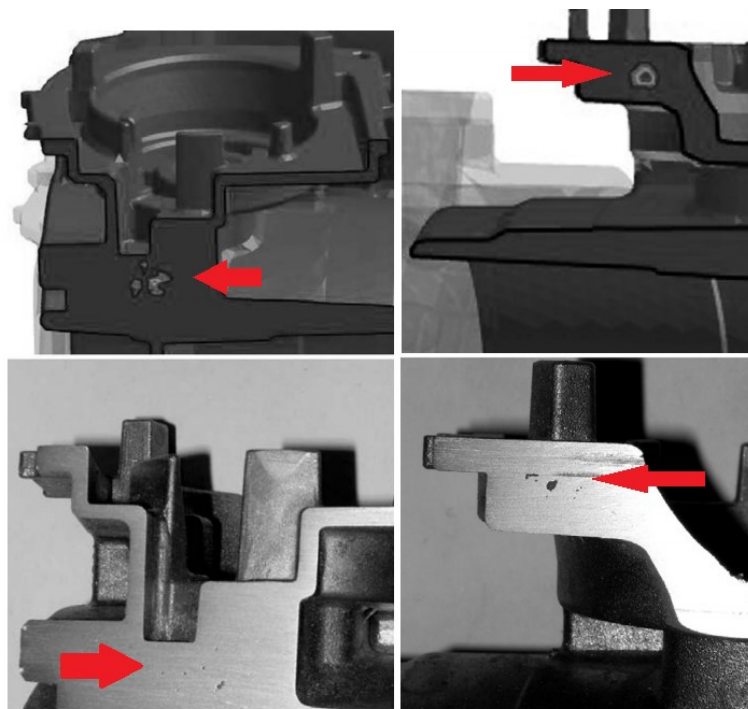
Dakle, konstruiranjem kalupa pomoću računala korištenjem CAD/CAM alata te simulacijom procesa lijevanja korištenjem dostupnih CAE alata postiže se niz prednosti kao što su kraće vrijeme konstruiranja i izrade kalupa, smanjenje mogućnosti nastanka grešaka, poboljšanje proizvodnje odljevaka, smanjenje ljevačkog odmetka, smanjenje ukupnih troškova itd. [2] Danas je dostupan velik broj alata za simulaciju lijevanja koji se upotrebljavaju u praksi. Neki od najčešće susretanih programa u literaturi su MAGMASOFT, ProCAST, QuikCAST itd.

QuikCAST je alat za simulaciju lijevanja koji se pojavio 1985. pod nazivom SIMULOR. QuikCAST predstavlja kompletno industrijsko rješenje za ljevaonice te omogućuje realna predviđanja osnovnih faza procesa lijevanja: punjenja kalupne šupljine, skrućivanja odljevka te nastanka poroznosti. Omogućava simulaciju lijevanja vrlo kompleksnih odljevaka. Primjenjuje se i za simulaciju postupaka kod kojih se lijeva silom gravitacije kao što su lijevanje u pijesak, kokilni lijev i sl. te postupke lijevanja pod tlakom kao što su niskotlačni i visokotlačni lijev. QuikCAST omogućuje preciznu simulaciju gibanja tlačnog klipa za vrijeme prve faze punjenja kalupne šupljine te njegov utjecaj na stvaranje poroznosti za vrijeme treće faze [18].

ProCAST je jedan od najmoćnijih te najpreciznijih alata za simulacija lijevanja dostupan danas. U svom prvom obliku pojavio se 1990. godine, a među njegovim korisnicima se nalaze kompanije kao što su Rolls Royce, General Electric te mnogi drugi [19]. ProCAST sadrži napredne module

za termomehaničku analizu pojave grešaka na odljevku i predviđanje trajnosti kalupa prije pojave pukotina i zamora materijala. ProCAST na temelju ulaznih podataka može simulirati punjenje kalupne šupljine taljevinom, naprezanja kokile pri tlačnom lijevanju, raspored temperatura kokile te vrijeme skrućivanja taljevine. ProCAST omogućuje simulaciju mnogih ljevačkih postupaka kao što su visokotlačno lijevanje, niskotlačno lijevanje, lijevanje u pješčane kalupe, kokilni lijev, centrifugalni lijev itd. I za ProCAST i QuikCAST dostupne su velike baze materijala koje omogućavaju korisniku da na temelju unesenog kemijskog sastava materijala predvidi temperaturna svojstva materijala potrebna da bi se valjano simulirao proces lijevanja [18].

Na slici 7.1 prikazana je usporedba rezultata dobivenih provođenjem eksperimenta na fizičkim odljevcima te rezultata dobivenih simulacijom procesa lijevanja u programu ProCAST iz članka [20]. Usporedbom rezultata došlo se do zaključka da su rezultati simulacije skrućivanja u sukladnosti sa rezultatima dobivenim na stvarnim odljevcima. Pokazalo se da se korištenjem simulacije može učinkovito predvidjeti pojava grešaka u odljevcima te smanjiti vrijeme ciklusa lijevanja [20].



Slika 7.1, Poroznost u odljevku (gore – simulacija; dolje-odljevak) [20]

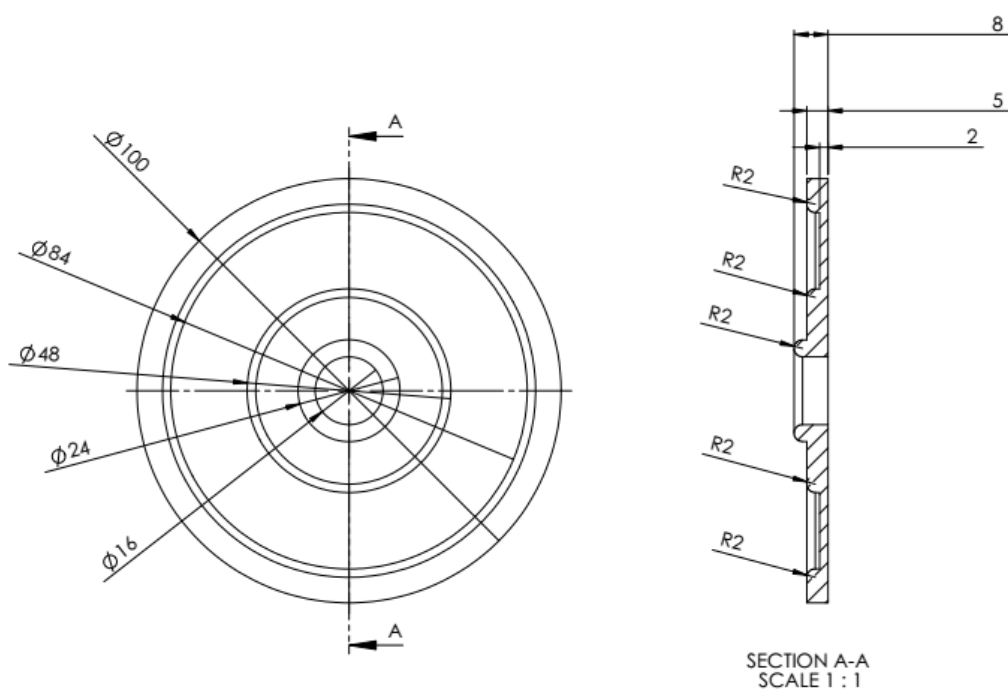
8. EKSPERIMENTALNI DIO

U ovom radu potrebno je za zadani model konstruirati dvije varijante uljevnog sustava za tlačni lijev. Za konstruirane varijante uljevnog sustava provesti simulaciju lijevanja u programskom paketu QuikCAST 2014 te analizirati dobivene rezultate u smislu kvalitete odljevka. Nakon toga na jednoj od varijanti ispitati utjecaj temperature predgrijavanja kokile na tijek punjenja, skrućivanje i kvalitetu odljevka.

8.1. Odljevak

Na slici 8.1 prikazan je crtež zadanog odljevka konstruiran u programu CATIA V5R20. Materijal odljevka je AlSi9Cu3, a osnovne informacije o odljevku su:

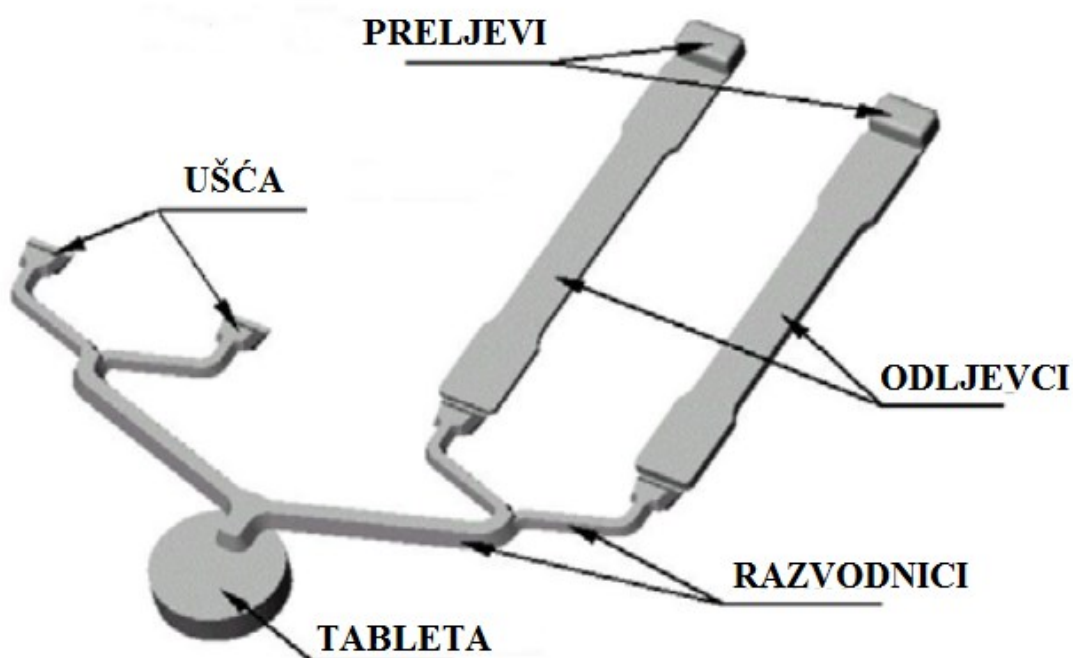
- volumen: 27,358 cm³
- masa: 27,36 kg
- gustoća: $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$



Slika 8.1, Dimenzije odljevka

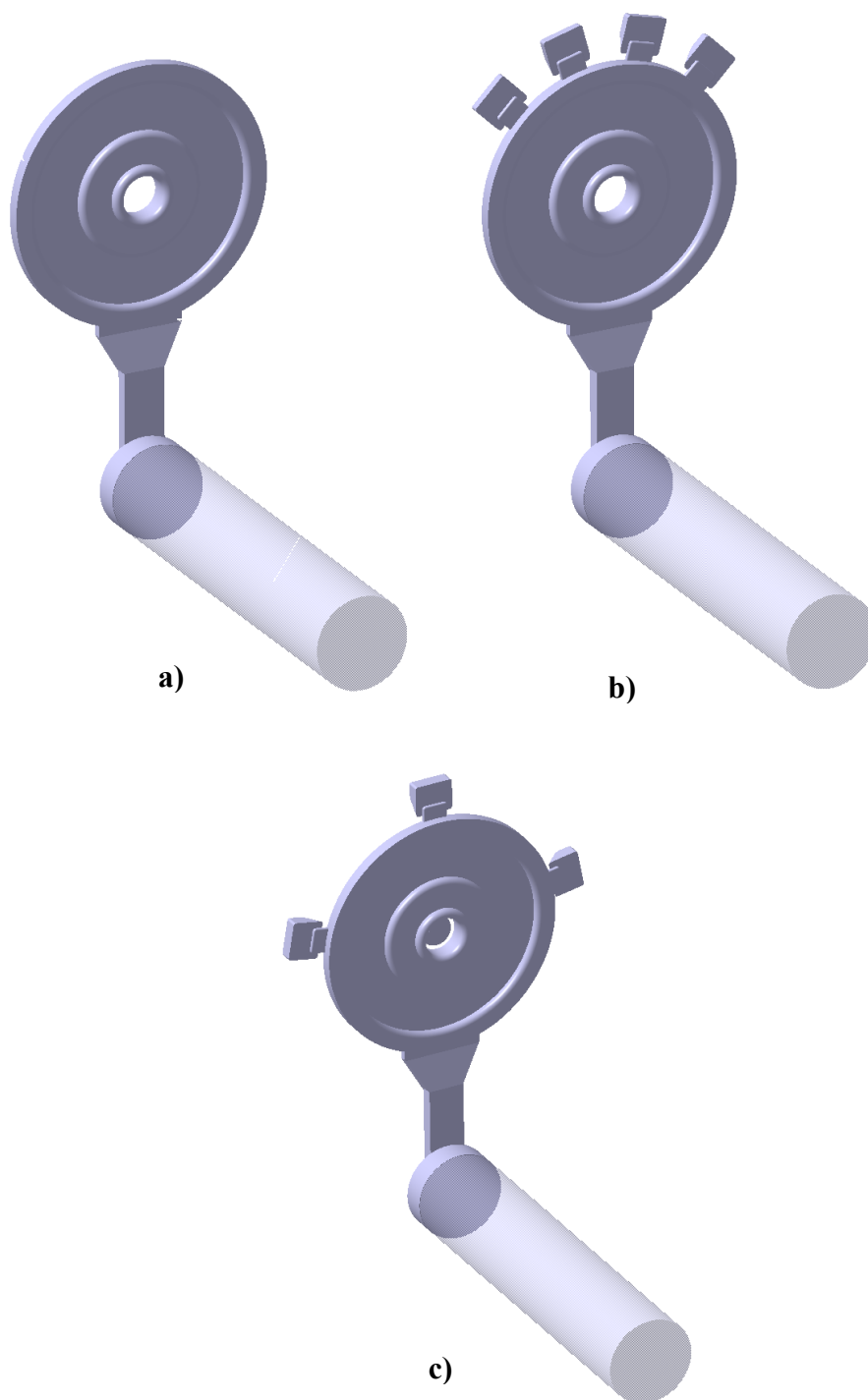
8.2. Uljevni sustav

Uljevni sustav je mreža kanala preko kojih taljevina ulazi u kalup i ispunjava kalupnu šupljinu. Uljevni sustav za tlačni lijev znatno se razlikuje od uljevnih sustava gdje se kao sila lijevanja koristi gravitacija (lijevanje u pijesak, pješčani lijev itd.) Osnovni elementi uljevnog sustava za tlačni lijev su ušće, razvodnik, tableta, preljevi te kanali za odzračivanje. Kao što je objašnjeno u poglavlju 5.1, rastaljeni metal prvo se ulijeva u tlačnu komoru, zatim se gibanjem tlačnog klipa putem razvodnika dovodi do ušća kroz koje ulazi u kalupnu šupljinu. Razvodnici su najčešće kružnog ili trapezoidnog poprečnog presjeka. Dimenzije ušća određuju se na temelju debljine stijenke odljevka, željenog vremena punjenja, željene brzine taljevine na ušću itd. [4] Tableta je ostatak viška metala koji se formira unutar tlačne komore za vrijeme skrućivanja. Preljevi su dio uljevnog sustava koji imaju nekoliko uloga. Služe kao hladila kako bi privukli višak topline na mjestima do kojih taljevina stigne posljednja. Preljevi se smještaju na ta mjesta i kako bi poslužili za izbacivanje zarobljenih plinova iz kalupa kroz odzračne kanale. Osim toga mogu služiti i kao mjesto na kojem će se postaviti izbacivala, kako bi se izbjeglo oštećivanje površine odljevka [14]. Navedene elemente uljevnog sustava za tlačni lijev prikazuje slika 8.2.

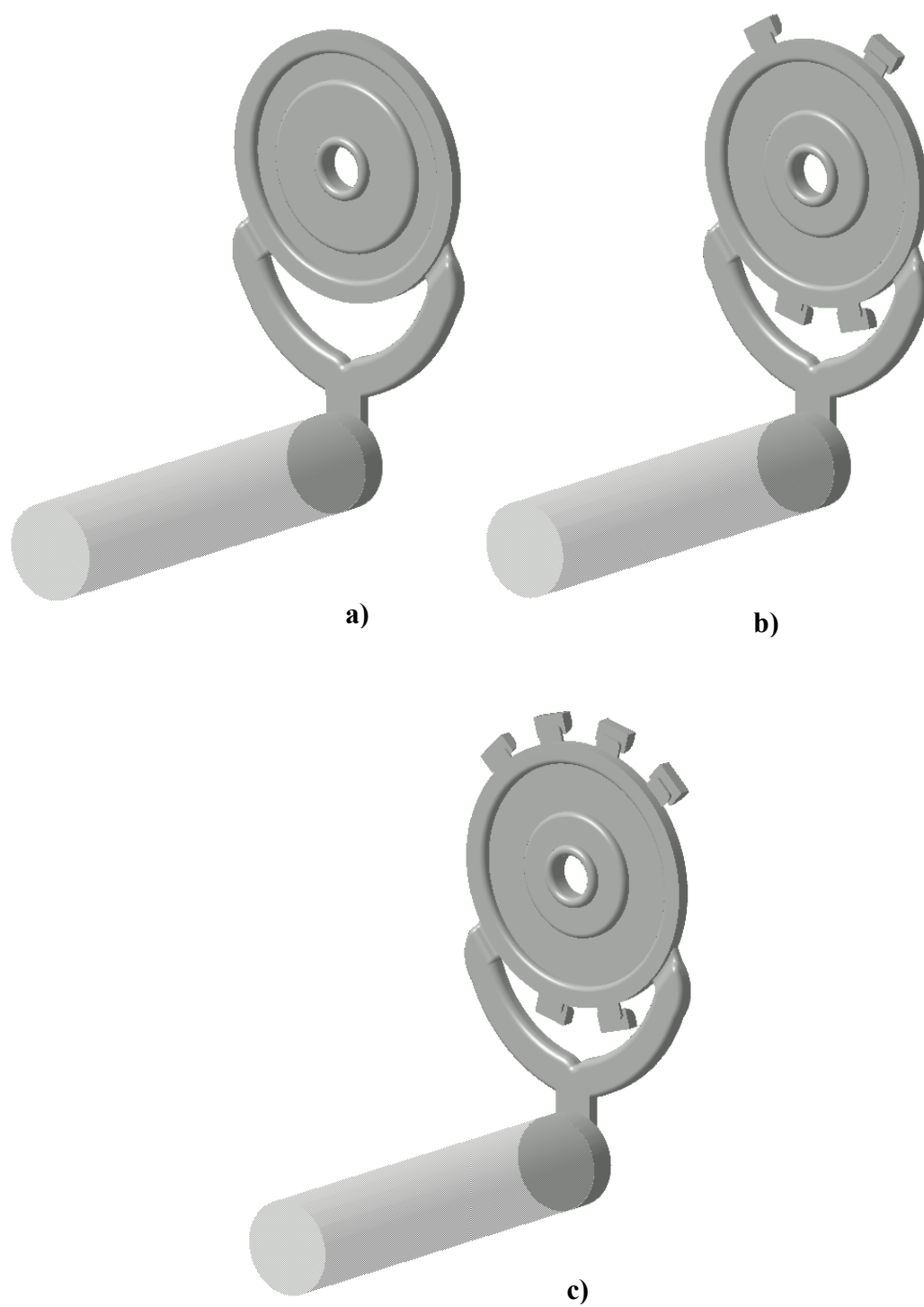


Slika 8.2, Elementi uljevnog sustav za tlačni lijev [21]

Za zadani odljevak konstruirani su uljevni sustavi sa jednim i sa dva ušća. Nadalje su izrađene varijante navedenih uljevnih sustava sa različitim smještajem preljeva na odljevku. Za svaku varijantu izvršena je simulacija lijevanja u svrhu analize toka taljevine i pojave poroznosti. Navedeni uljevni sustavi njihove varijante prikazani su na slici 8.3, te slici 8.4.



Slika 8.3, Uljevni sustav s jednim ušćem: a) bez preljeva, b) prva varijanta, c) druga varijanta



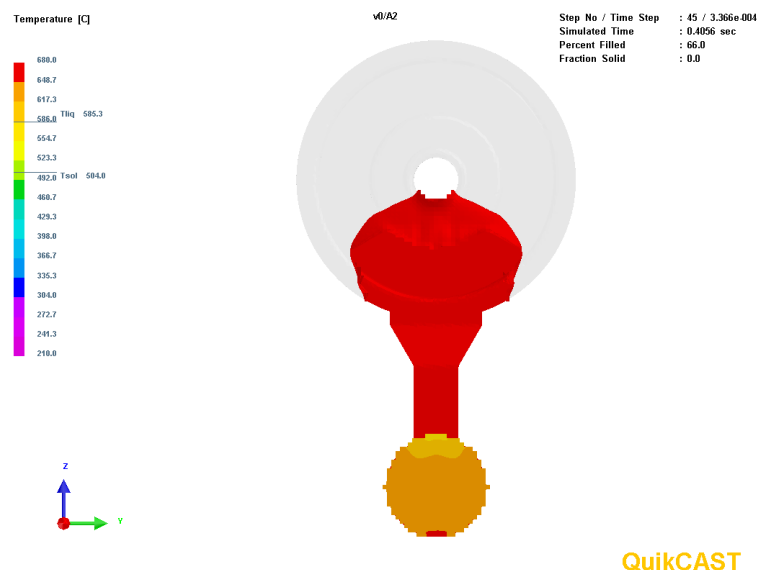
Slika 8.4, Uljevni sustav s dva ušća: a) bez preljeva, b) prva varijanta, c) druga varijanta

8.2.1. Rezultati simulacije za uljevni sustav sa jednim ušćem (bez preljeva)

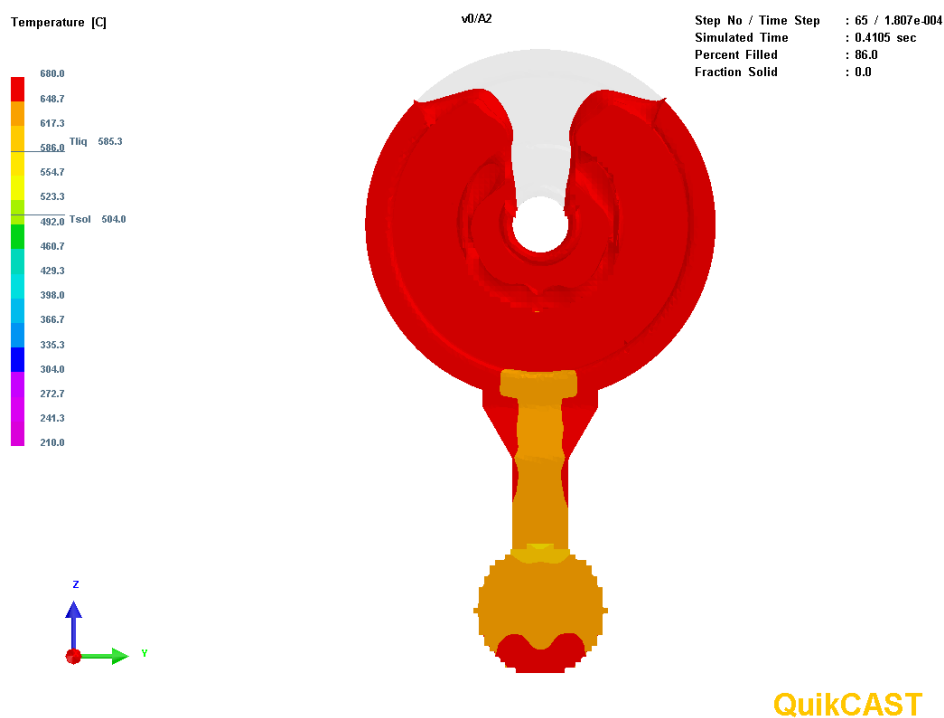
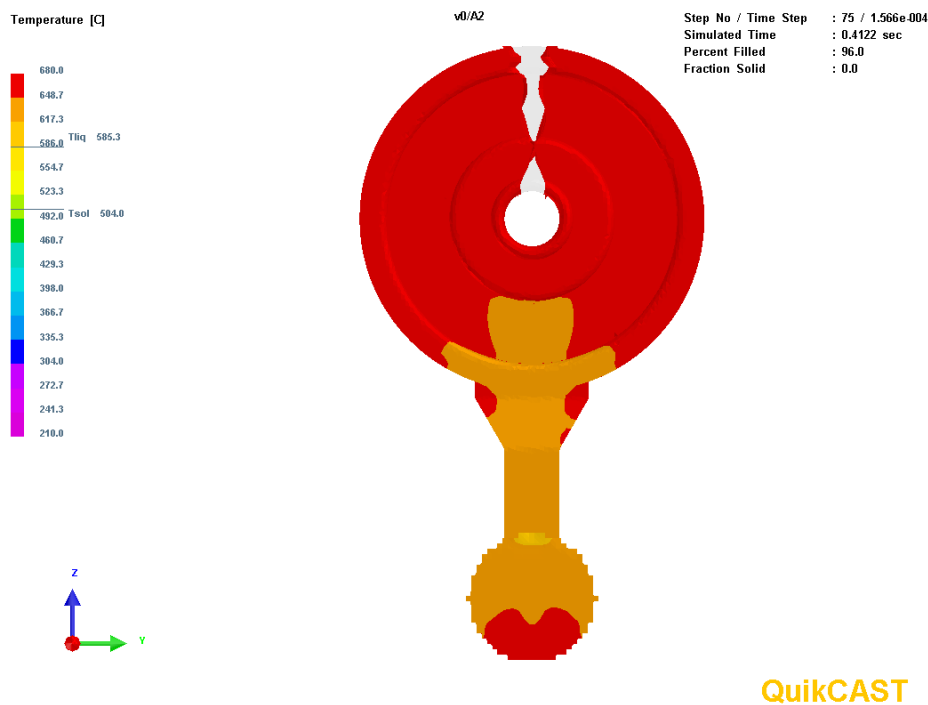
Na slici 8.5 prikazani su rezultati simulacije za varijantu uljavnog sustava sa jednim ušćem bez preljeva. Parametri lijevanja dani su u tablici 8.1. Zbog geometrije razvodnika taljevina se oko središnjeg provrta raspodjeljuje u dva smjera pod 45° te se dva mlaza spajaju sa gornje strane odljevka. Stoga je izrađena prva varijanta uljavnog sustava sa četiri preljeva smještena po gornjem obodu odljevka, kako je prikazano na slici 8.8.

Tablica 8.1, Parametri lijevanja za uljevni sustav sa jednim ušćem

Legura	AlSi9Cu3
Temperatura lijevanja, °C	680
Temperatura kokile, °C	210
Površina presjeka ušća, cm ²	0,100
Gibanje klipa u prvoj fazi:	40/0,35
Položaj, mm/ Brzina, m/s	120/0,6
Početak druge faze, mm	120
Brzina klipa druge faze, m/s	3
Promjer klipa, mm	36
Aktivna duljina komore, mm	170
Ispunjenost komore taljevinom, %	27
Učink napajanja, %	95

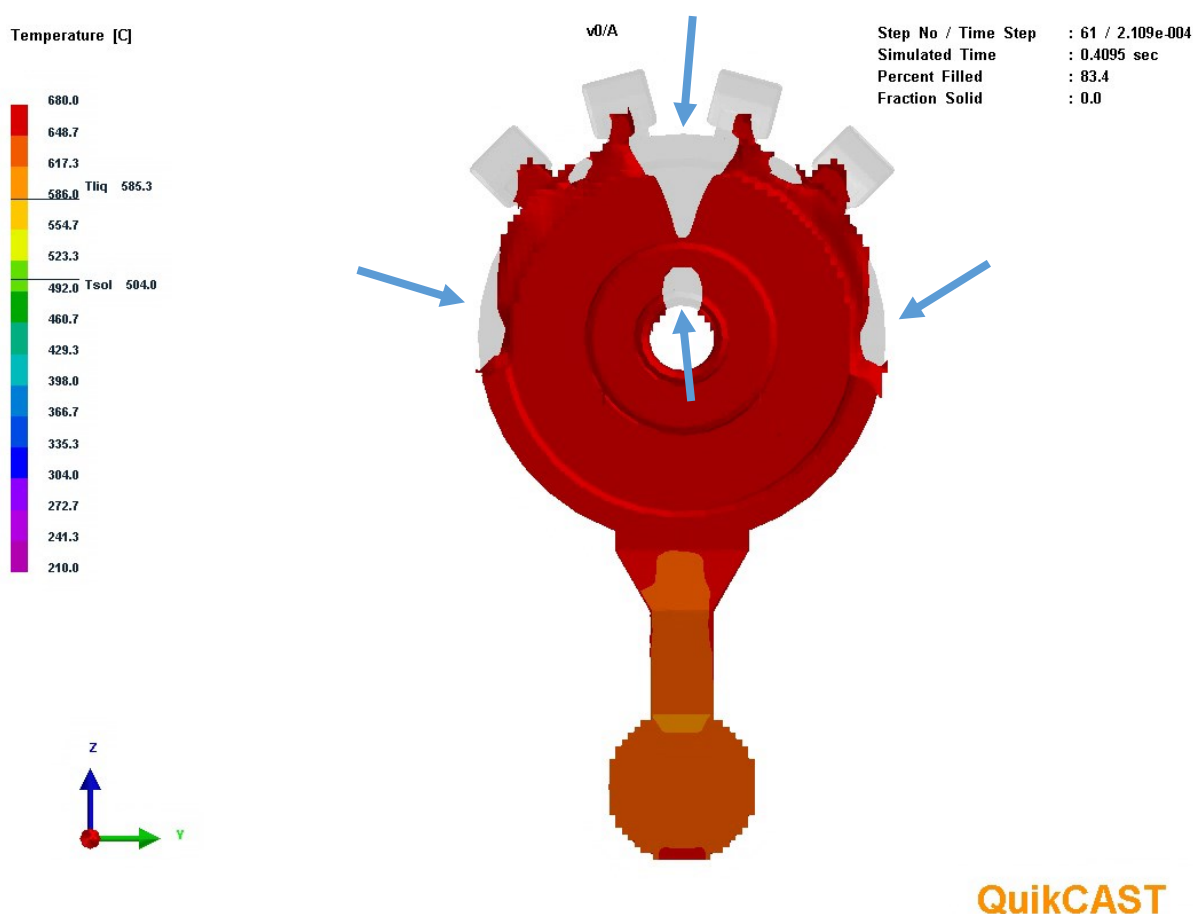


Slika 8.5, Rezultati simulacije uljavnog sustava s jednim ušćem (bez preljeva), t=0,4056 s

Slika 8.6, Rezultati simulacije uljevnog sustava s jednim ušćem (bez preljeva), $t=0,4105$ sSlika 8.7, Rezultati simulacije uljevnog sustava s jednim ušćem (bez preljeva), $t=0,4122$ s

8.2.1.1. Rezultati simulacije za uljevni sustav sa jednim ušćem (v1)

Na slici 8.8, prikazan je tok taljevine kod prve varijante uljevnog sustava sa jednim ušćem. Vidljivo je da pri kraju popunjavanja kalupne šupljine postoje mjesta kod kojih bi moglo doći do zarobljavanja zraka (označeno strelicama). U drugoj varijanti uljevnog sustava preljevi su smješteni na upravo te pozicije te su analizirani rezultati.

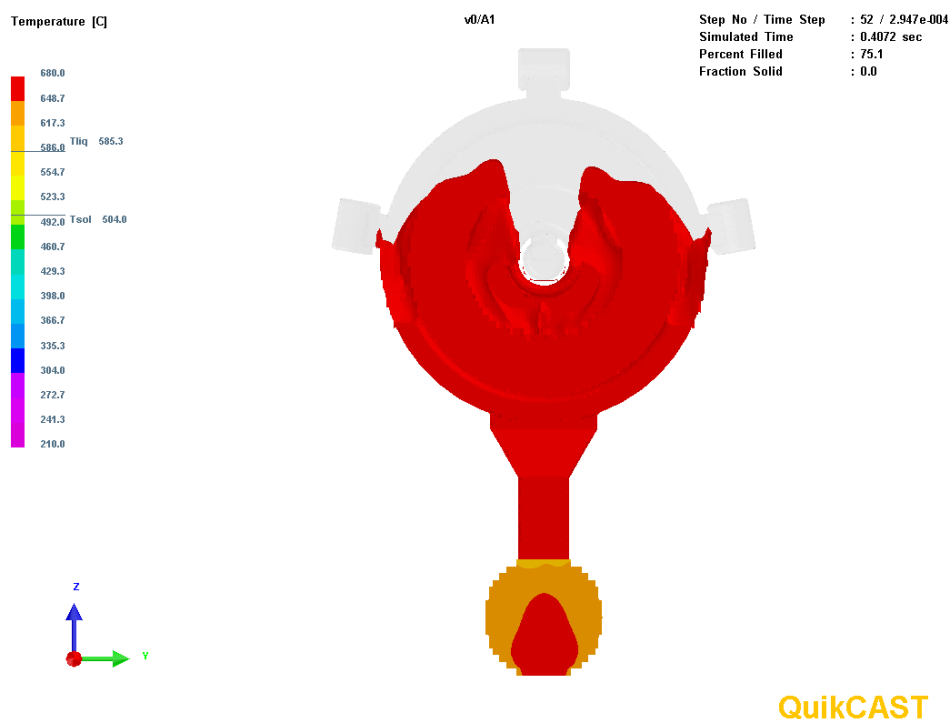


Slika 8.8, Rezultati simulacije prve varijante uljevnog sustava s jednim ušćem, $t=0,4095$ s

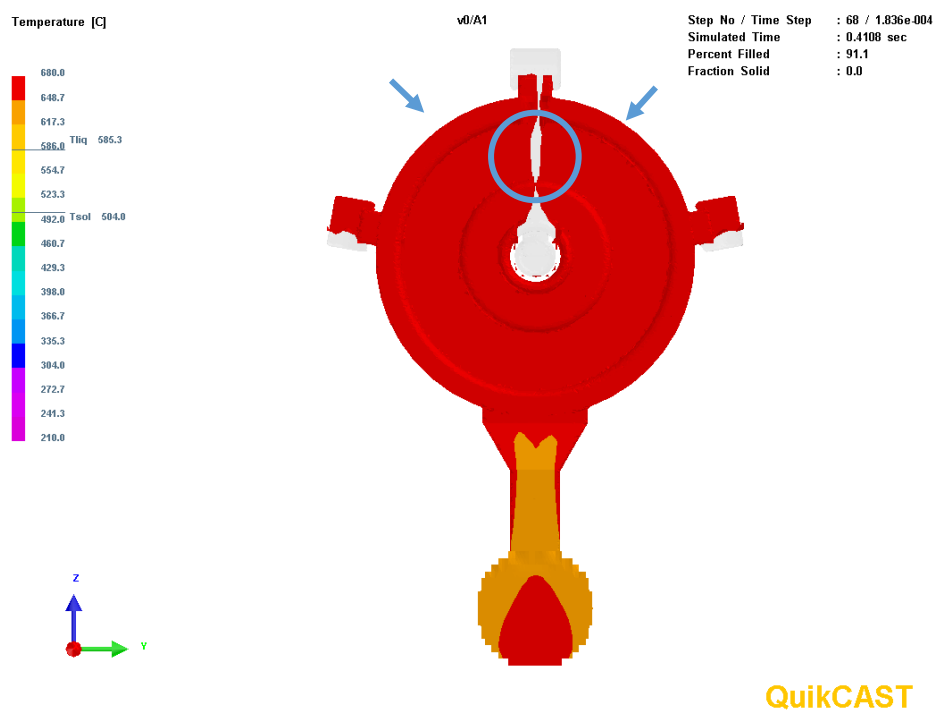
8.2.1.2. Rezultati simulacije za uljevni sustav sa jednim ušćem (v2)

Slike 8.9 i 8.10 prikazuju drugu varijantu uljevnog sustava s jednim ušćem. Iz rezultata simulacije može se uočiti da su bočni preljevi dobro smješteni. U ovom je slučaju uslijed manjeg broja preljeva po gornjem obodu odljevka (kao u ranijem slučaju) taljevina brže napredovala uz stjenku

pa postoji mogućnost zarobljavanja zraka na mjestu spajanja dva mlaza, kako je označeno na slici 8.10.



Slika 8.9, Rezultati simulacije druge varijante uljavnog sustava s jednim ušćem, $t=0,4072$ s



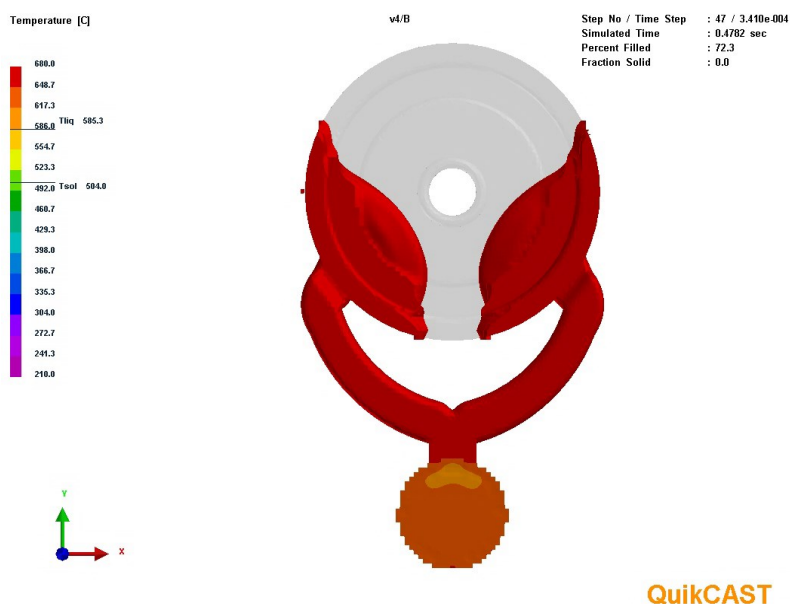
Slika 8.10, Rezultati simulacije druge varijante uljavnog sustava s jednim ušćem, $t=0,4108$ s

8.2.2. Rezultati simulacije za uljevni sustav sa dva ušća (bez preljeva)

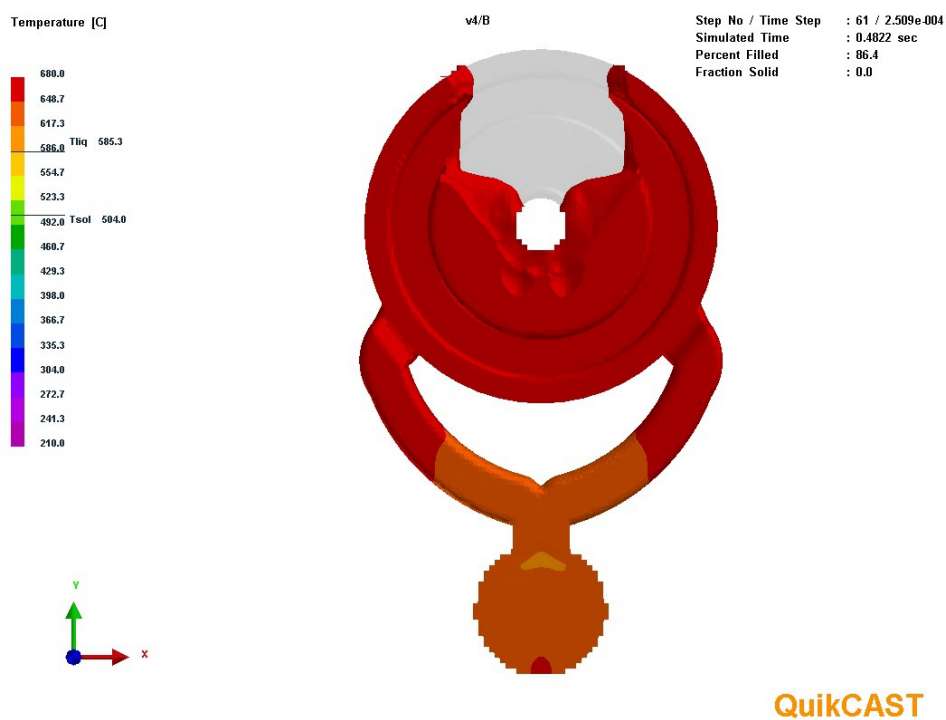
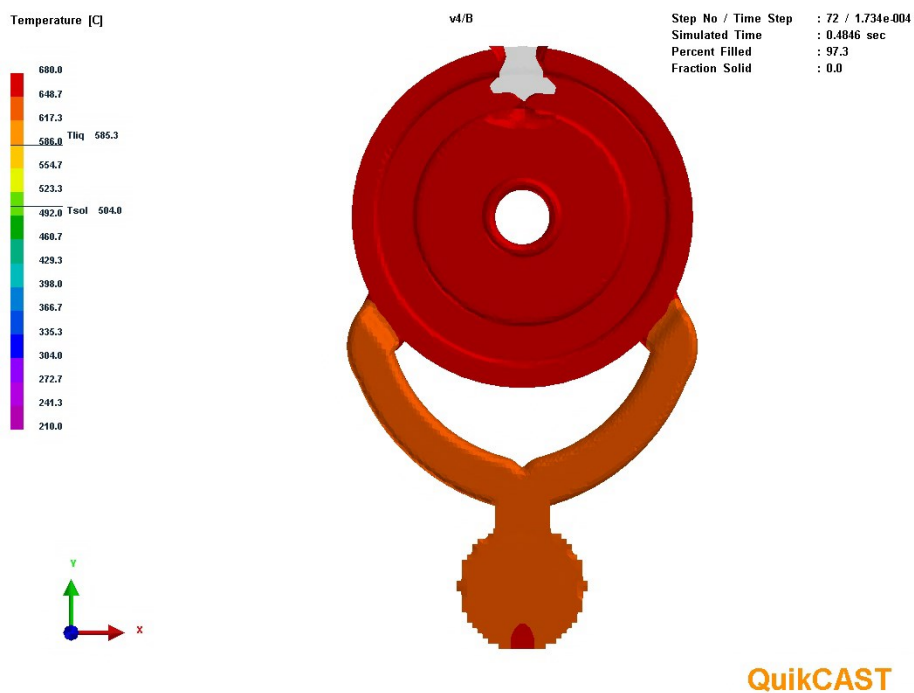
U ovom poglavlju prikazani su rezultati simulacije uljevnog sustava sa dva ušća. Može se uočiti da se dva mlaza iz svakog ušća spajaju i sa gornje i sa donje strane odljevka. Mjesta gdje se spajaju dva mlaza predstavljaju pogodne pozicije za smještanje preljeva. Parametri lijevanja dani su u tablici 8.2.

Tablica 8.2, Parametri lijevanja za uljevni sustav sa dva ušća

Legura	AlSi9Cu3
Temperatura lijevanja, °C	680
Temperatura kokile, °C	210
Površina presjeka ušća, cm ²	0,100
Gibanje klipa u prvoj fazi:	40/0,35
Položaj, mm/ Brzina, m/s	120/0,6
Početak druge faze, mm	120
Brzina klipa druge faze, m/s	3
Promjer klipa, mm	36
Aktivna duljina komore, mm	170
Ispunjenost komore taljevinom, %	32
Učinek napajanja, %	95

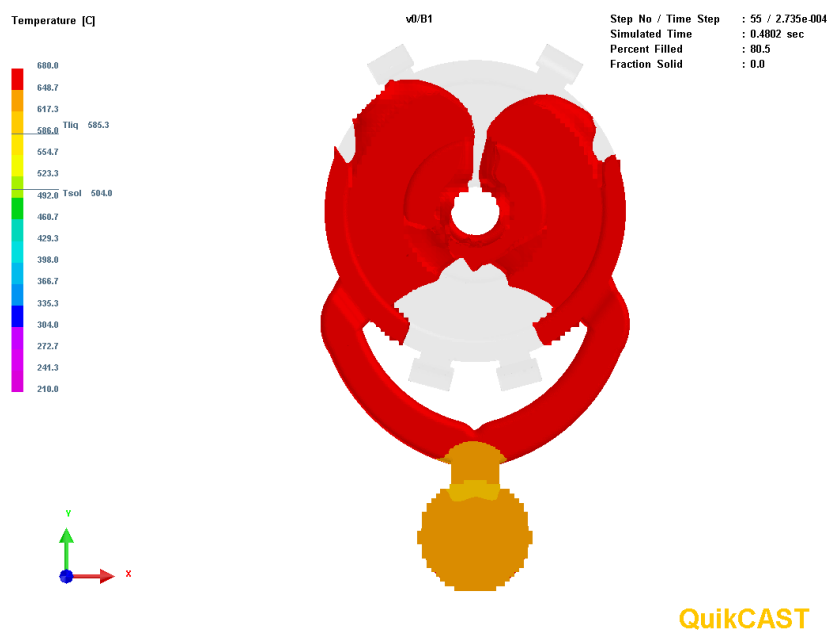


Slika 8.11, Rezultati simulacije uljevnog sustava s dva ušća (bez preljeva), t=0,4782 s

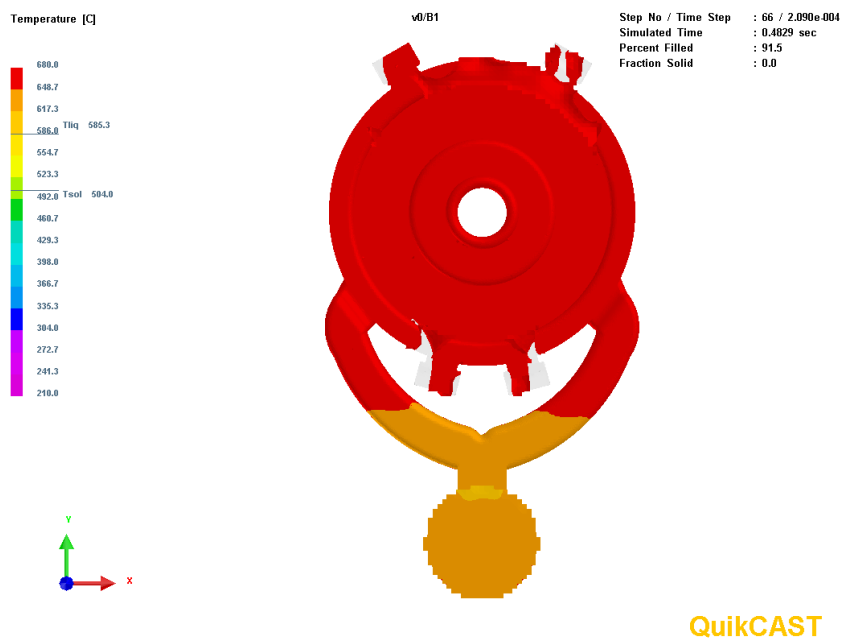
Slika 8.12, Rezultati simulacije uljevnog sustava s dva ušća (bez preljeva), $t=0,4822$ sSlika 8.13, Rezultati simulacije uljevnog sustava s dva ušća (bez preljeva), $t=0,4846$ s

8.2.2.1. Rezultati simulacije za uljevni sustav sa dva ušća (v1)

Slike 8.14 i 8.15 prikazuju rezultate simulacije za prvu varijantu uljavnog sustava sa dva ušća. Iz rezultata je vidljivo da taljevina veliku količinu zraka potiskuje prema gornjoj strani odljevka, pa bi na tom mjestu bilo pogodno postaviti veći broj preljeva.



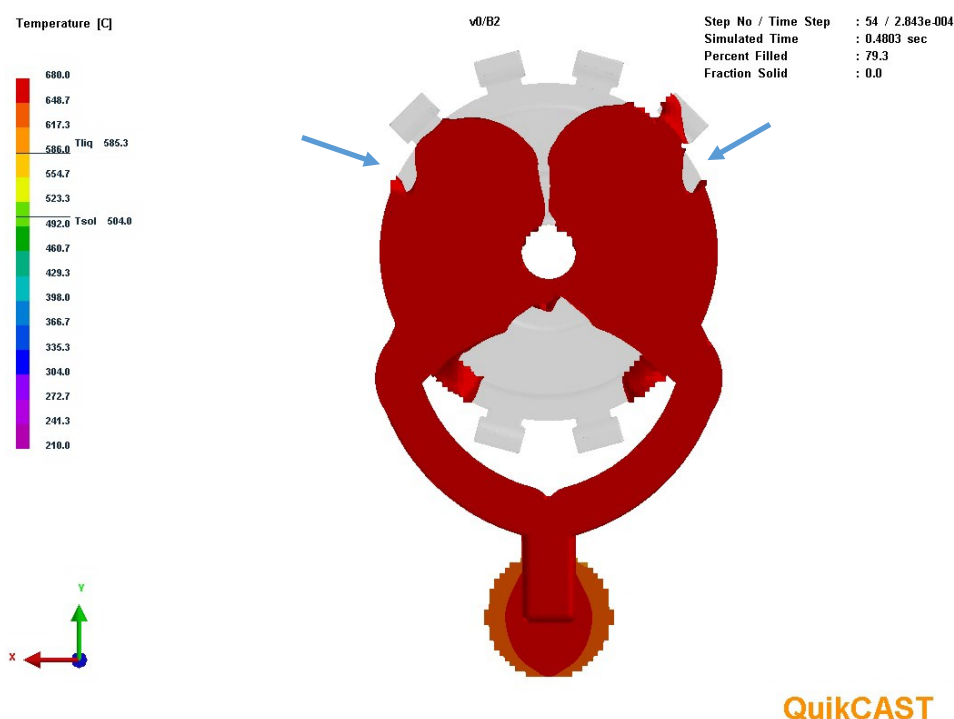
Slika 8.14, Rezultati simulacije prve varijante uljavnog sustava s dva ušća, $t=0,4802$ s



Slika 8.15, Rezultati simulacije prve varijante uljavnog sustava s dva ušća, $t=0,4829$ s

8.2.2.2. Rezultati simulacije za uljevni sustav sa dva ušća (v2)

Slika 8.16 prikazuje rezultate simulacije za drugu varijantu uljavnog sustava sa dva ušća. Iz slika se može zaključiti da nema velike razlike glede toka taljevine unutar kalupne šupljine između ove i prethodne varijante (v1). Preljevi smješteni po gornjem obodu niti u ovoj varijanti nisu smješteni sa dovoljnim razmakom kako bi se izbjeglo eventualno zarobljavanje zraka unutar taljevine na mjestima označenim strelicama na slici 8.16.



Slika 8.16, Rezultati simulacije druge varijante uljavnog sustava s dva ušća, $t=0,4803$ s

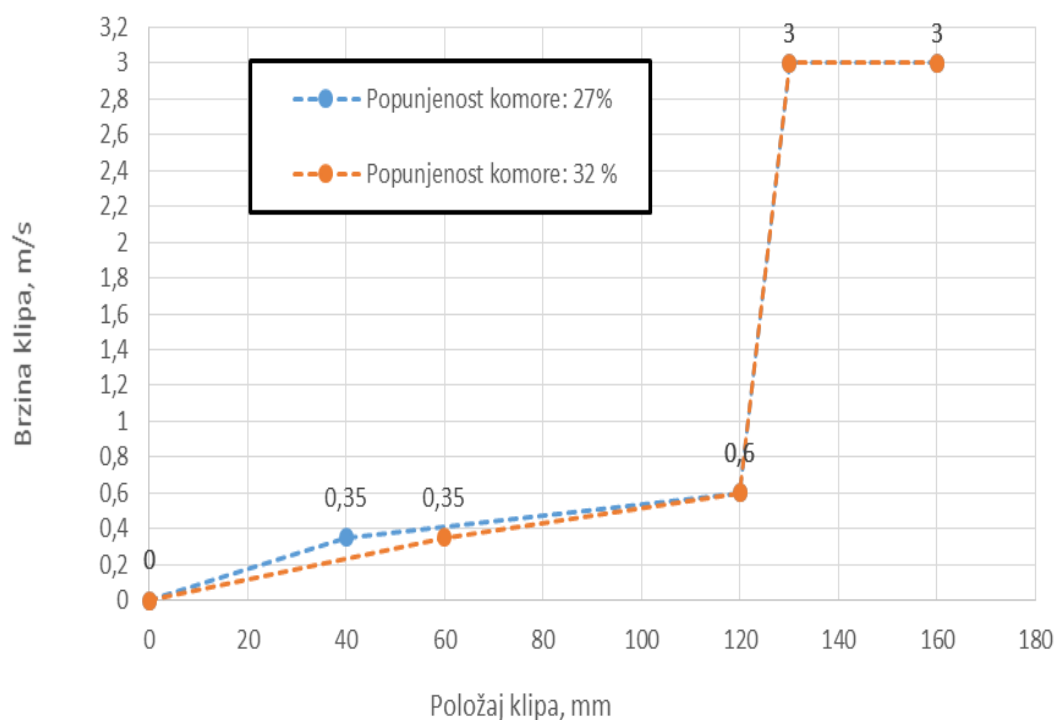
8.3. Gibanje klipa

Jedan od prvih koraka prilikom određivanja parametara lijevanja kod tlačnog lijeva je podešavanja brzine gibanja klipa. Gibanje klipa mora biti takvo da uslijed potiskivanja taljevine ne dođe do zarobljavanja zraka unutar taljevine. Do zarobljavanja zraka unutar taljevine može doći uslijed nedostatne ili prevelike brzine gibanja klipa, kako je objašnjeno u poglavlju 5.1., a shematski prikazano na slici 5.2.

Osim mogućih problema sa formiranjem vala prilikom udara o stjenku komore (prikazano na slici 5.2.b) te ne ispunjavanja komore taljevinom po čitavoj visini (prikazano na slici 5.2.a) moguća je i

pojava otkidanja vala prije nego taljevina dotakne stjenku tlačne komore. Do toga dolazi u slučaju velike duljine tlačne komore, male popunjenosti tlačne komore taljevinom te prevelike brzine i akceleracije klipa. Naročito sklone ranom otkidanju vala su tlačne komore manjeg omjera visine i dužine. Za tlačne komore omjera visine i dužine 0,15 potrebno je pažljivo odabrati vrijednosti brzine i ubrzanja klipa jer postoji velika vjerojatnost otkidanja vala, upravo zbog relativno velike duljine tlačne komore u odnosu na visinu [12].

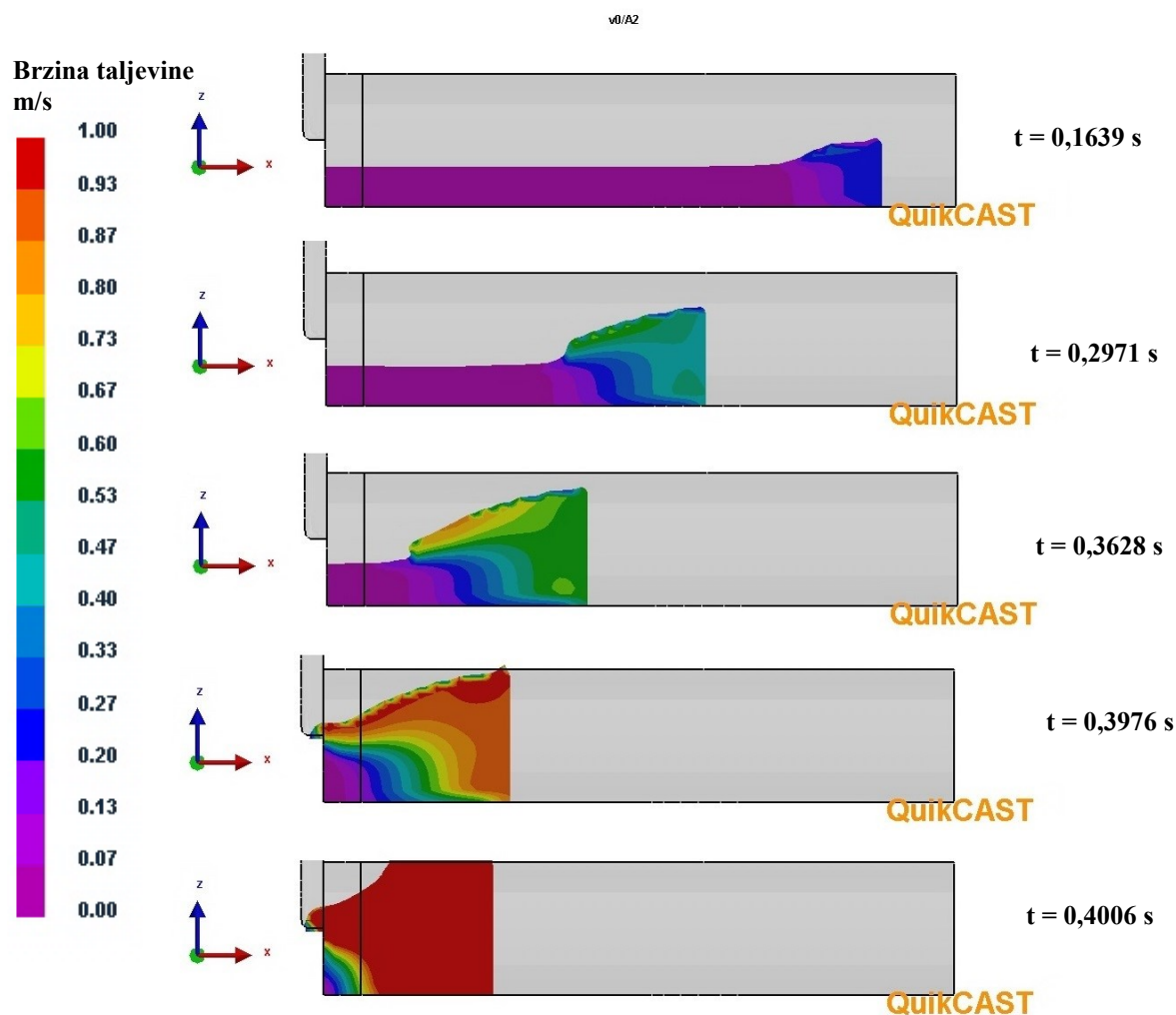
Za zadani slučaj aktivna duljina tlačne komore je 170 mm, a promjer klipa 36 mm, odnosno omjer visine i duljine klipa iznosi 0,21. Stoga je za očekivati otkidanje vala taljevine i prije dostizanja visine stjenke. Kako bi se postigao željeni oblik vala u prvoj fazi potrebno je ostvariti takvo gibanje klipa da ne dođe do otkidanja vala, a da pritom val po svojoj visini dosegne stjenku tlačne komore prije početka druge faze. Nakon nekoliko iteracija došlo se do brzina kretanja klipa prikazanih na grafu na slici 8.17.



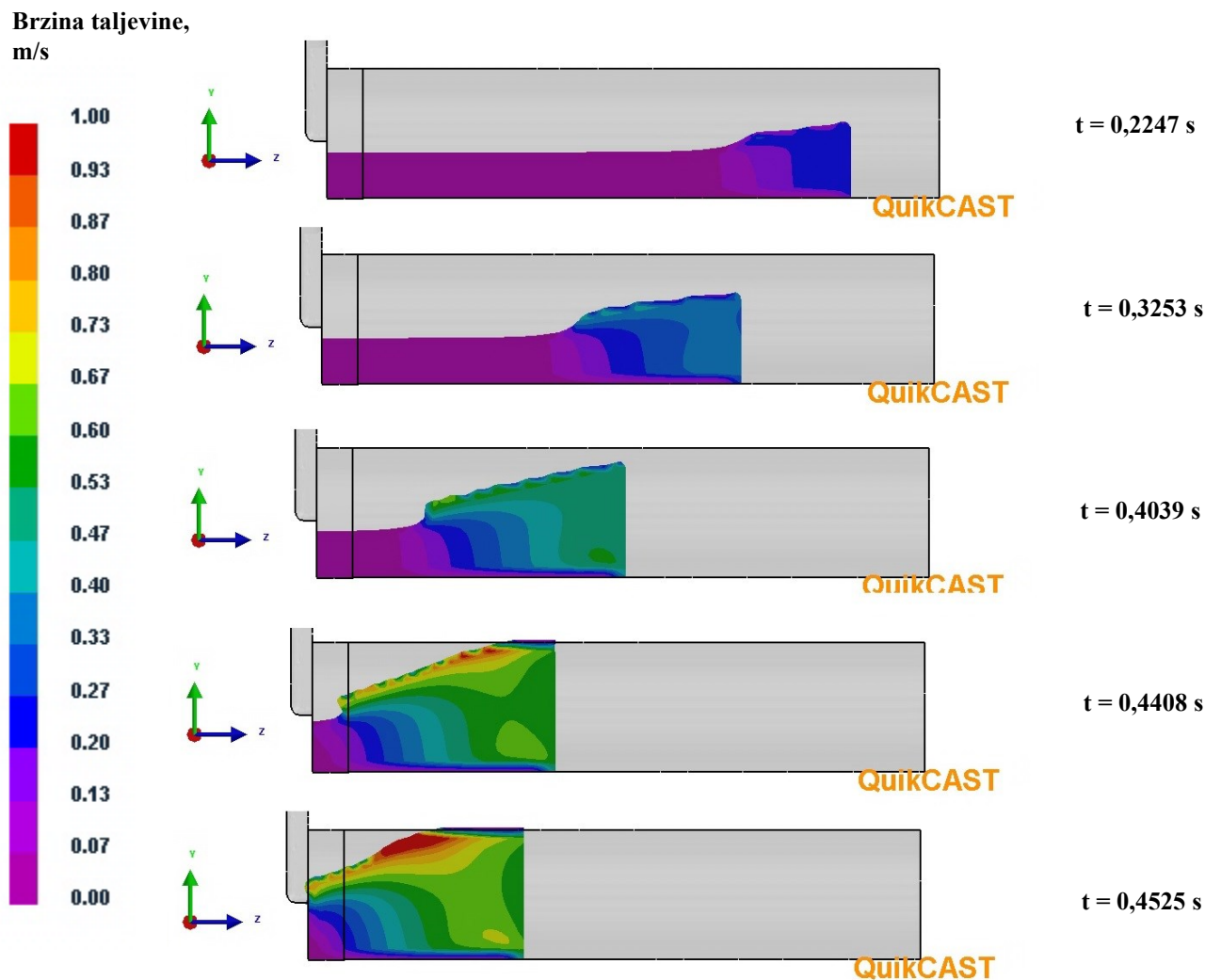
Slika 8.17, Gibanje klipa za vrijeme prve faze

Plavom krivuljom prikazane su brzine gibanja klipa za uljevni sustav sa jednim ušćem, pri čemu je ispunjenost tlačne komore iznosila 27%, a narančastom brzine gibanja klipa za uljevni sustav sa dva ušća, pri čemu je ispunjenost tlačne komore taljevinom iznosila 32%. Nešto veći iznos ubrzanja prilikom početka gibanja, koji se može uočiti u oba slučaja, bio je potreban kako bi se na

samom početku osiguralo dovoljno povećanje visine vala. U slučaju premalog ubrzanja val nije uspio dostići potrebnu visinu prije početka druge faze. Manja akceleracija u nastavku gibanja bila je potrebna kako ne bi došlo do preranog otkidanja vala. U slučaju veće popunjenosti tlačne komore, za slučaj sa dva ušća gdje je popunjenost 32%, bilo je potrebno podesiti nešto manju vrijednost početne akceleracije jer je u protivnom dolazilo do otkidanja vala na samom početku gibanja klipa. Rezultate simulacije pri brzinama danim na slici 8.17, prikazani su na slici 8.18 za slučaj ispunjenosti komore od 27% te na slici 8.19 za ispunjenost komore od 32%.



Slika 8.18, Gibanje klipa kod popunjenosti tlačne komore od 27%



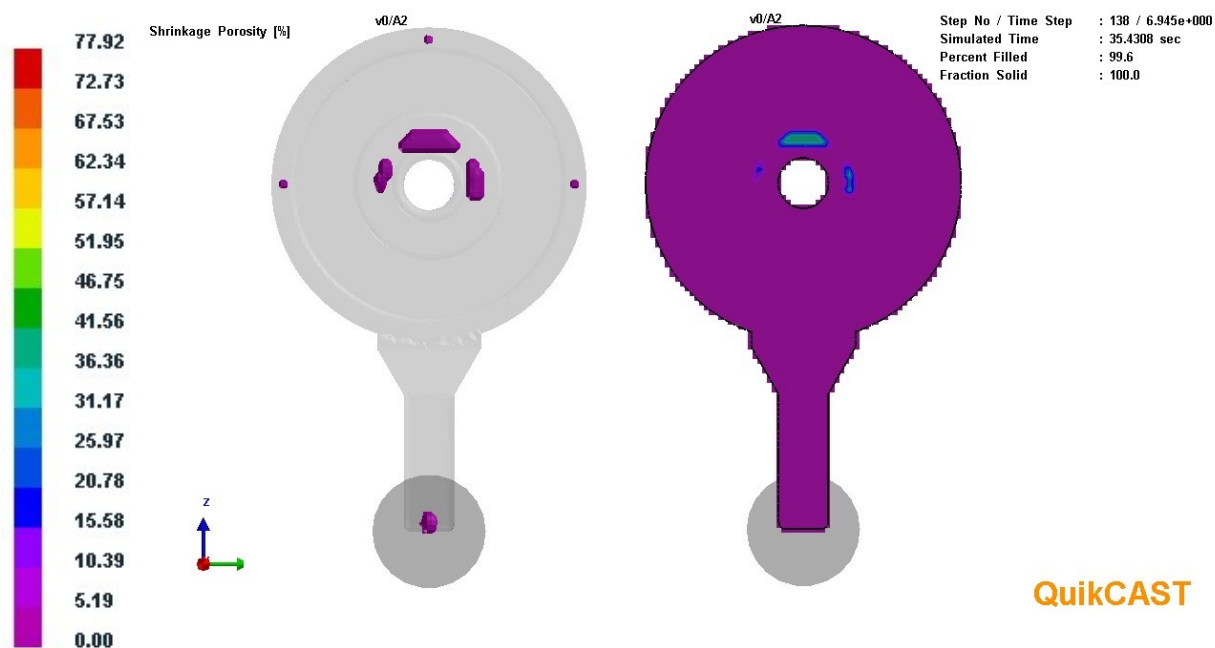
Slika 8.19, Gibanje klipa kod popunjenosti tlačne komore od 32%

8.4. Poroznost

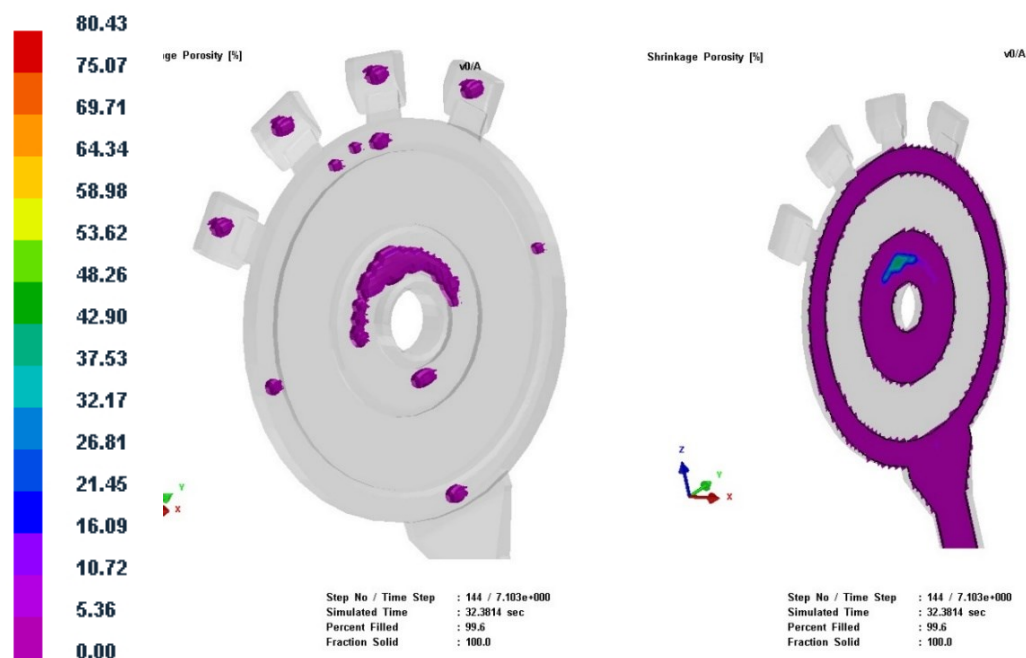
U sljedećem odlomku prikazane su dobivene vrijednosti poroznosti za sve varijante uljevnih sustava sa jednim i sa dva ušća.

8.4.1. Poroznost uljevnih sustava sa jednim ušćem

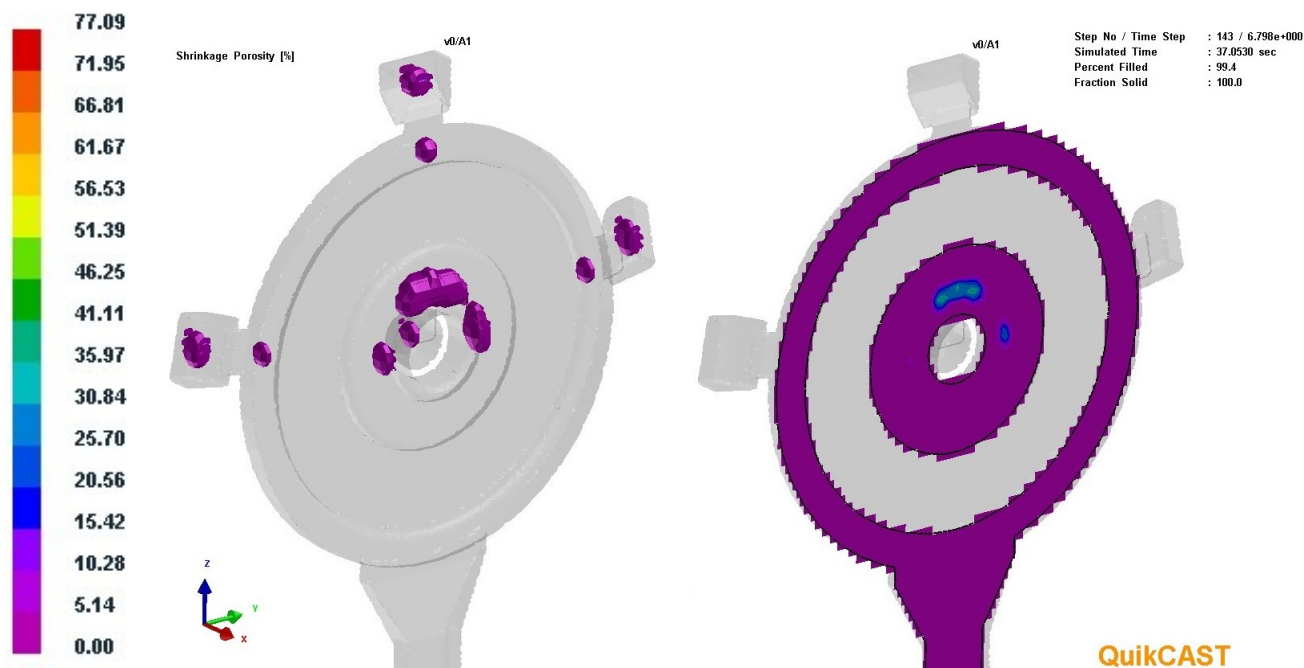
Slike 8.20, 8.21 i 8.22 prikazuju dobivene rezultate poroznosti za varijante uljevnog sustava sa jednim ušćem.



Slika 8.20, Poroznost uljevnog sustava s jednim ušćem (bez preljeva)



Slika 8.21, Poroznost prve varijante uljevnog sustava s jednim ušćem

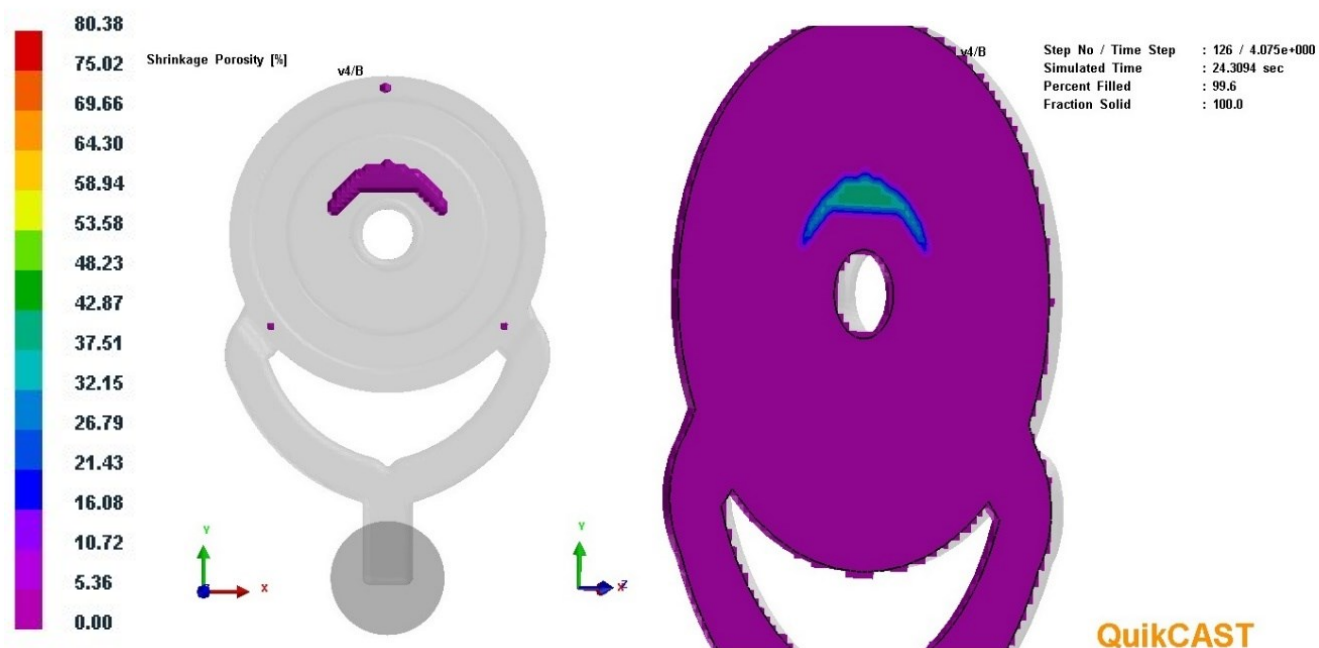


Slika 8.22, , Poroznost druge varijante uljevnog sustava s jednim ušćem

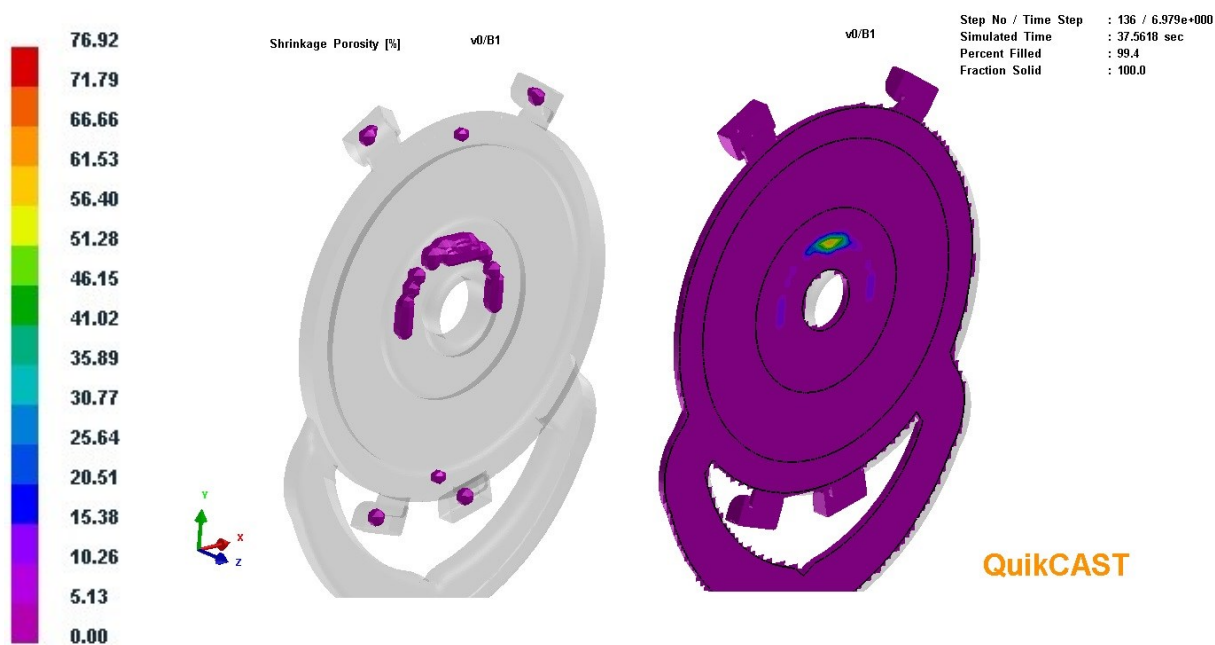
Iz rezultata simulacije može se vidjeti da se najviše poroznosti stvara u području oko provrta u sredini odljevka. To je područje gdje je debljina stijenke 5 mm koje se posljednje skrućuje. Iz presjeka se vidi da je vjerojatnost pojave poroznosti na određenim mjestima oko 40%. Usporedbom rezultata za dvije varijante uljevnog sustava sa jednim ušćem, sa slike 8.21 i slike 8.22, vidljivo je da su bolji rezultati dobiveni za varijantu broj 2.

8.4.2. Poroznost uljevnih sustava sa dva ušća

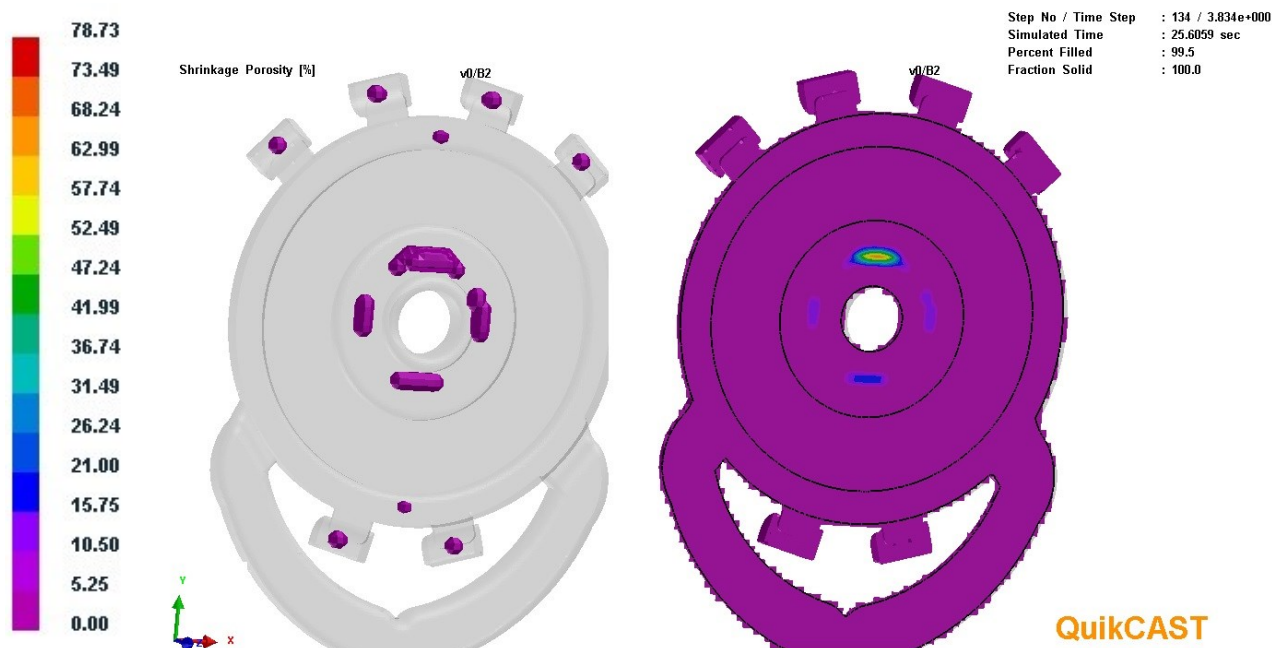
Na slikama 8.23, 8.24 i 8.25 prikazani su dobiveni rezultati poroznosti za varijante uljevnog sustava sa dva ušća.



Slika 8.23, Poroznost uljevnog sustava s dva ušća (bez preljeva)



Slika 8.24, Poroznost prve varijante uljevnog sustava s dva ušća



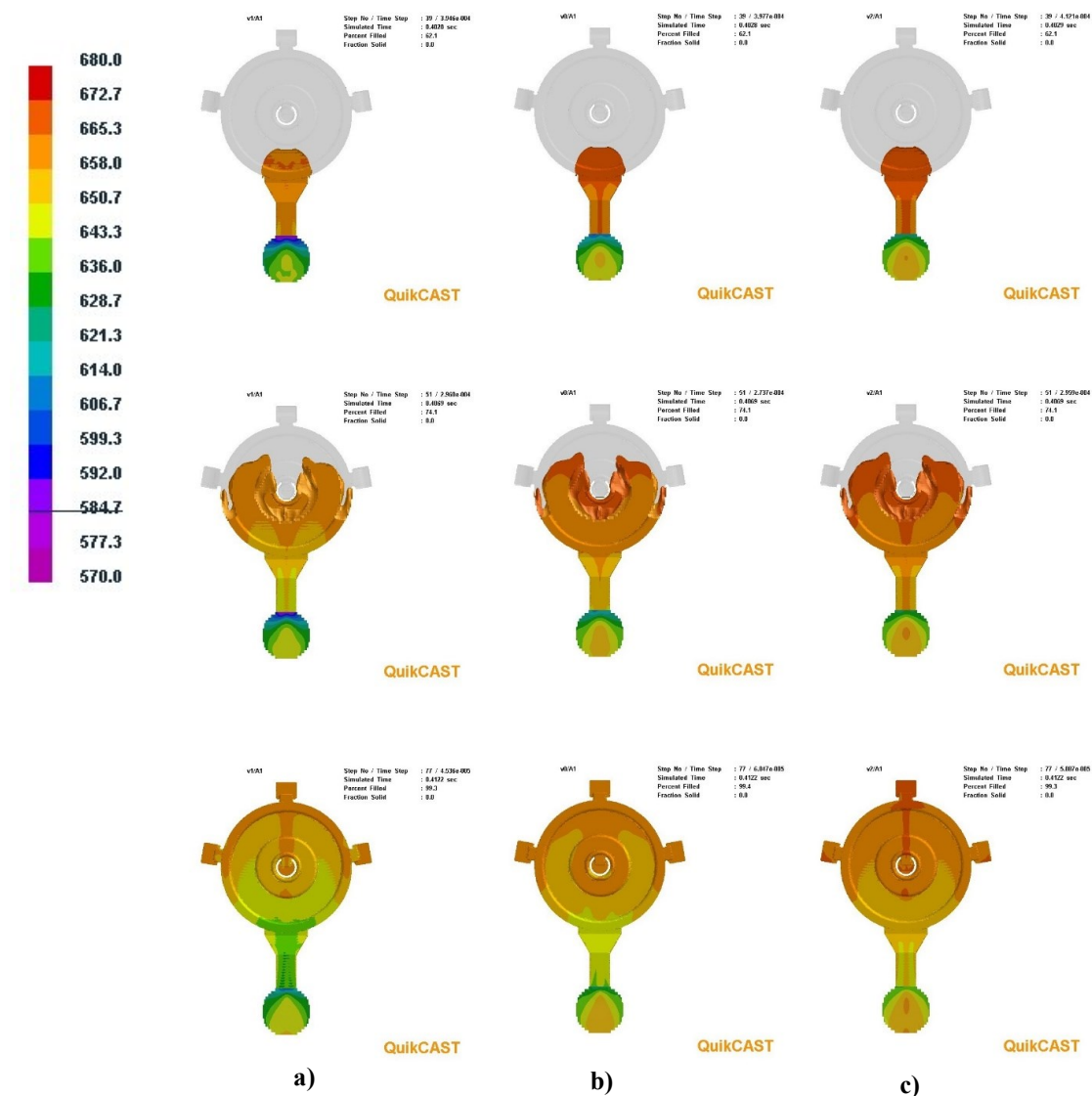
Slika 8.25, Poroznost druge varijante uljevnog sustava s dva ušća

Za slučaj uljevnog sustava sa dva ušća opet je očekivano najkritičnije područje oko središnjeg provrta na odljevku. U ovim varijantama uljevnog sustava, vjerojatnost pojave poroznosti je oko 65% na određenim mjestima, što je nešto nepovoljnije nego za slučaj varijanti uljevnih sustava sa jednim ušćem.

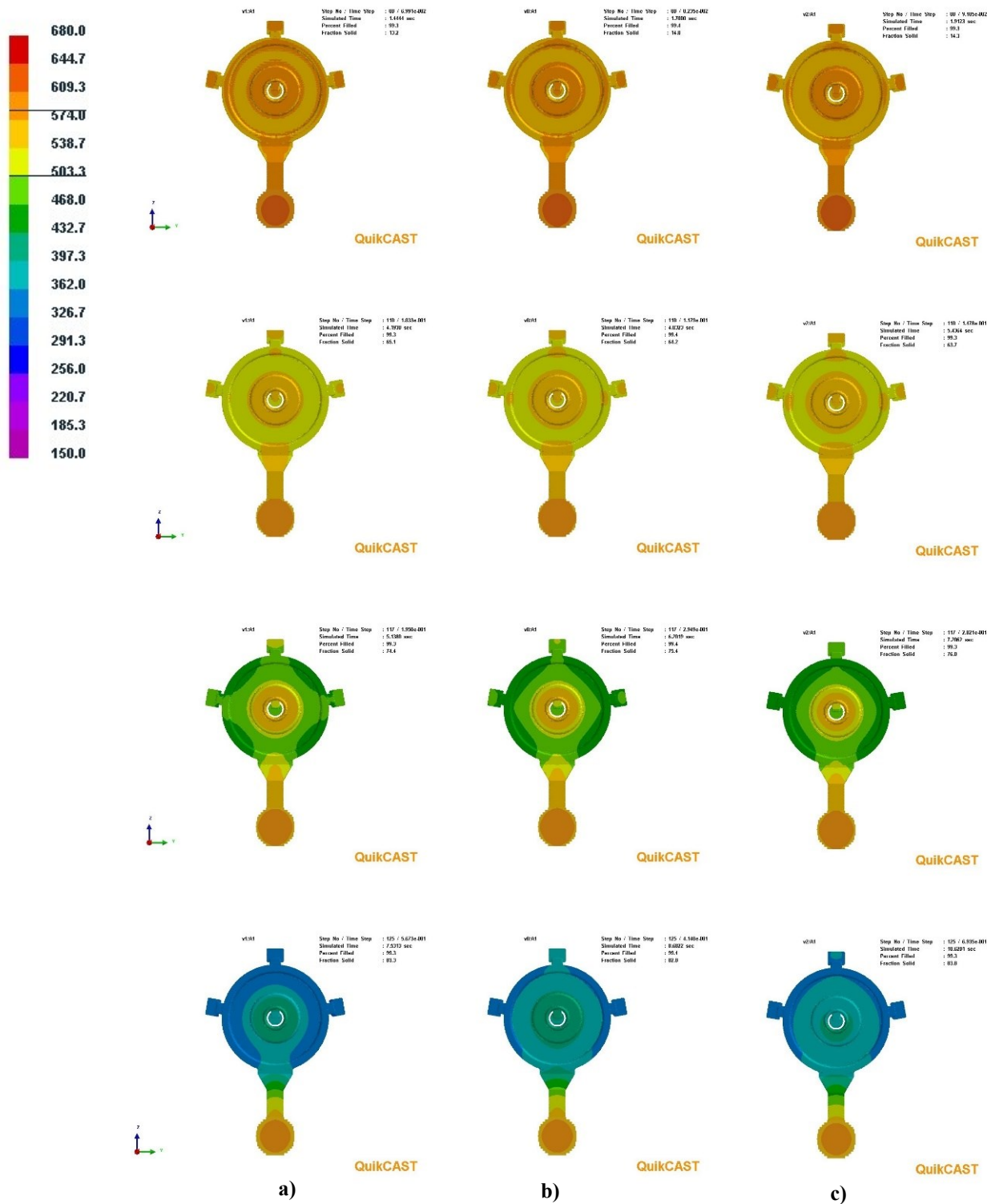
Iz priloženih rezultata vidljivo je da je raspodjela poroznosti unutar odljevka za gotovo sve varijante vrlo slična i uglavnom koncentrirana oko središnjeg dijela odljevka debljine stijenke 5 mm. Nešto veća vjerojatnost pojave poroznosti pokazala se kod uljevnih sustava sa dva ušća, gdje je vjerojatnost pojave poroznosti na pojedinim mjestima dosegla i 65%. Što se rezultata poroznosti između varijanti uljevnog sustava sa jednim ušćem tiče, nešto povoljnijim se pokazala druga varijanta (slika 8.22). Iz tog razloga ta se varijanta odabire za ispitivanje utjecaja temperature kokile na tijek punjenja i skrućivanja kalupne šupljine te svojstva odljevka.

8.5. Utjecaj temperature kokile

Za drugu varijantu uljevnog sustava sa jednim ušćem ispitan je utjecaj temperature kokile na tijek punjenja kalupne šupljine i skrućivanja odljevka. Uz rezultate simulacije prikazane u poglavlju 6.2.1.2. pri kojoj je temperatura kokile iznosila 210°C, provedene su još dvije simulacije pri temperaturama kokile od 150°C te 250°C. Ostali parametri ostali su nepromijenjeni, prema tablici 8.1. Rezultati sve tri simulacije prikazani su na slici 8.26 te slici 8.27.

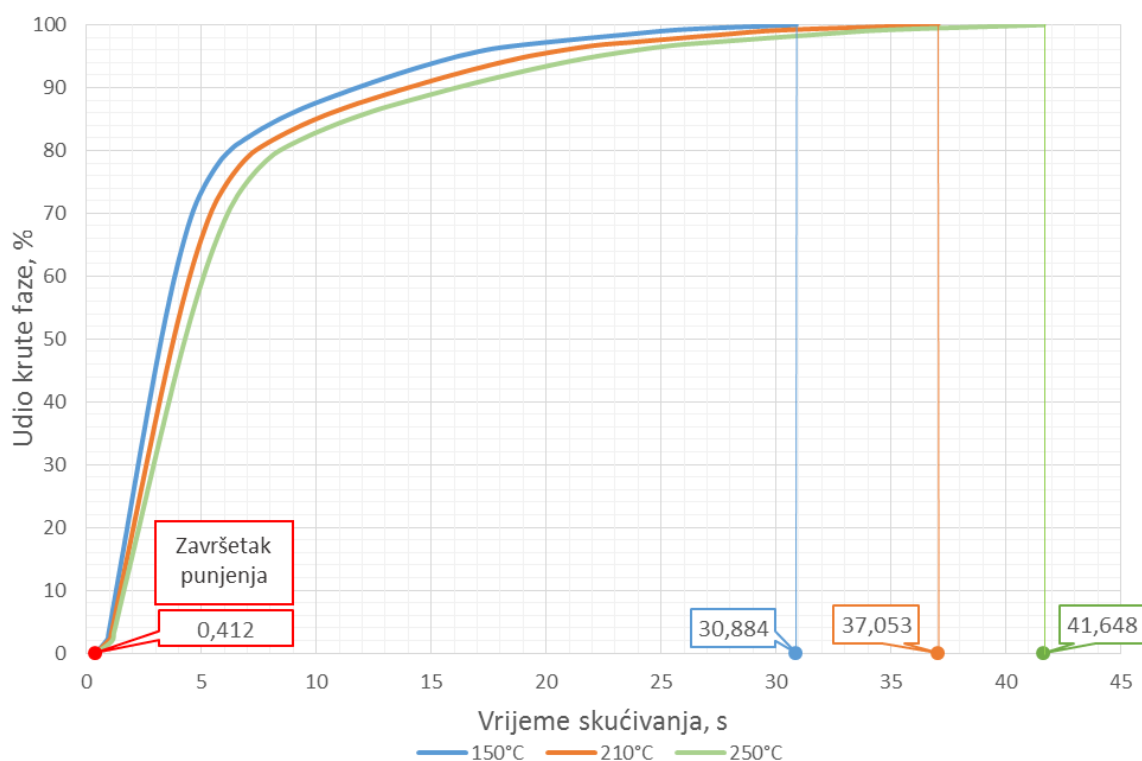


Slika 8.26, Tijek punjenja kalupne šupljine pri temperaturi kokile: a) 150°C, b) 210°C, c) 250°C

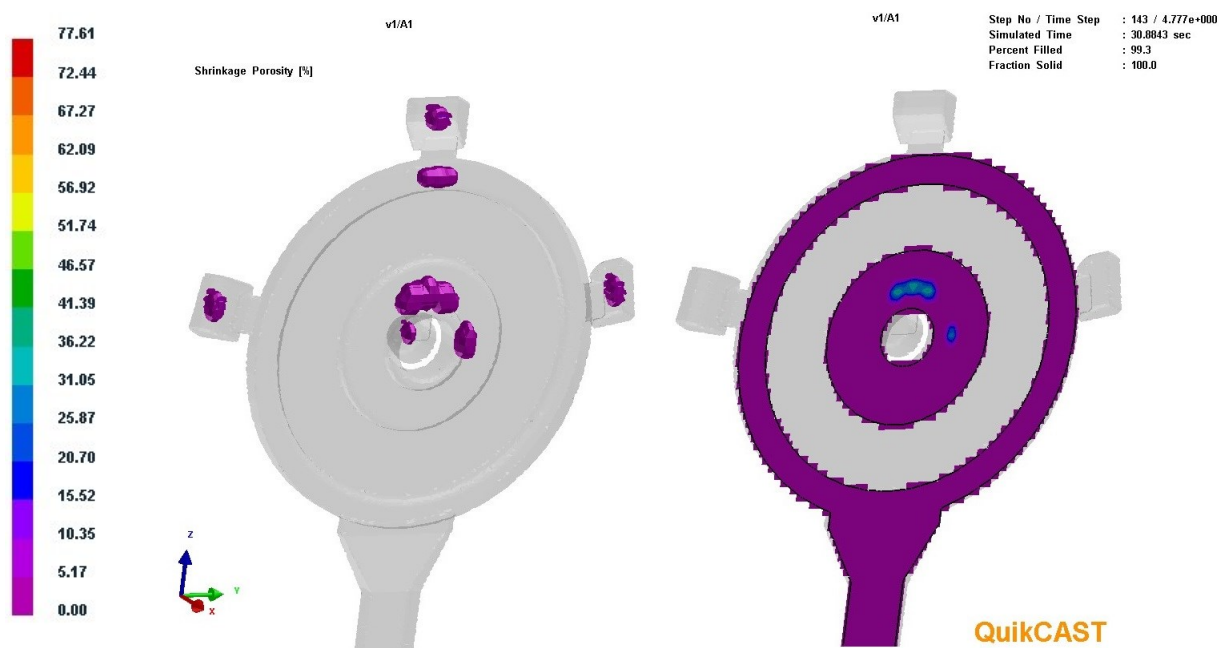


Slika 8.27, Tijek skrućivanja odljevka pri temperaturi kokile: a) 150°C, b) 210°C, c) 250°C

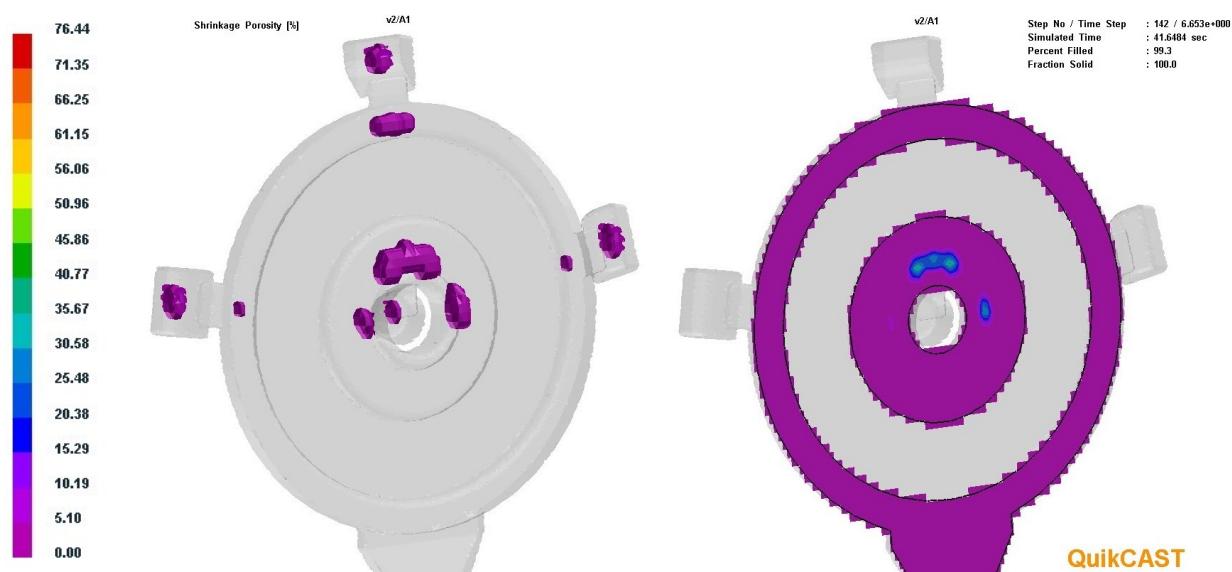
Na slici 8.26. prikazan je raspored temperature taljevine unutar kalupne šupljine u različitim trenucima tokom punjenja. Iako je vidljivo da temperatura taljevine brže pada što je temperatura kokile niža, ne primjećuje se znatan utjecaj temperature predgrijavanja kokile na tok taljevine unutar kalupne šupljine. Za sva tri slučaja kalupna šupljina u potpunosti je ispunjena taljevinom nakon 0,412 s. Razlog tome su relativno male dimenzije odljevka. Kod odljevaka većih dimenzija veliki pad temperature taljevine za vrijeme faze punjenja mogao bi dovesti do preranog skrućivanja te grešaka poput nedolivenosti odljevka ili hladnih zavora. Raspored temperatura prilikom skrućivanja prikazan je na slici 8.27. Kod skrućivanja je očekivano utjecaj temperature kokile izraženiji. To je posebice vidljivo u vremenu skrućivanja. Vrijeme kod kojeg se odljevak potpuno skrutnuo pri temperaturi kokile od 150°C iznosilo je 30,884 s, kod temperature kokile od 250°C 37,056 s te kod temperature kokile od 250°C 41,648 s. Pomoću podataka o udjelu krute faze u pojedinim koracima simulacije izvučenih iz programa QuikCAST izrađene su krivulje sa slike 8.28 na kojima se zornije može vidjeti utjecaj temperature predgrijavanja kokile na tijek skrućivanja odljevka.



Slika 8.28, Utjecaj temperature predgrijavanja kokile na tijek skrućivanja odljevka



Slika 8.29, Poroznost pri temperaturi predgrijavanja kokile od 150°C



Slika 8.30, Poroznost pri temperaturi predgrijavanja kokile od 250°C

Slike 8.29 i 8.30 prikazuju raspored poroznosti pri temperaturi kokile od 150°C i 250°C. Raspored poroznosti pri temperaturi kokile od 210°C prikazan je na slici 8.22 u poglavlju 8.4.1. Iz danih slika vidljivo je da za sva tri slučaja temperature pregrijavanja kokile simulacija ne pokazuje značajne razlike između razmještaja ni vjerojatnosti pojave poroznosti u odljevcima.

9. ZAKLJUČAK

U ovom radu dan je pregled tehnologije tlačnog lijeva. Zbog upotrebe visokog tlaka omogućuju se kratki ciklusi lijevanja, proizvodnja tankostijenih odljevaka te odljevaka kompleksne geometrije. Odljevci lijevani ovim postupkom imaju izvrsna mehanička svojstva, dimenzijsku točnost i kvalitetu površine. Upravo zbog toga primjenjuju se u mnogim industrijskim područjima, naročito automobilske industriji. Posebna pažnja dana je tehnološkim parametrima procesa tlačnog lijevanja, konkretnije brzinama kretanja tlačnog klipa, temperaturi kalupa te njihovim utjecajima na formiranje grešaka u odljevcima. Pažljivim podešavanjem brzina kretanja klipa, točke prijelaza između faza te naknadnog tlaka može se izbjeći zarobljavanje zraka i pojava plinske poroznosti u odljevku te pojava drugih grešaka kao što su hladni zavari, tople pukotine, plinski mjehuri itd.

U eksperimentalnom dijelu rada za zadani odljevak konstruirane su dvije izvedbe uljevnog sustava za tlačni lijev: izvedba uljevnog sustava sa jednim ušćem te izvedba uljevnog sustava sa dva ušća i njihove varijante. Za svaku izvedbu uljevnog sustava izrađene su dvije varijante sa različitim položajima preljeva te provedene simulacije u programskom paketu QuikCAST 2014. Iz rezultata simulacije analiziran je tok taljevine za vrijeme popunjavanja kalupne šupljine te vjerojatnost pojave poroznosti u odljevku. Pokazalo se da simulacija može biti iznimno koristan alat u fazi konstrukcije uljevnog sustava kako bi se odredio položaj preljeva te zamijetili eventualni nedostaci uljevnog sustava koji se tada mogu ispraviti. U svim slučajevima rezultati simulacije su pokazali veliku vjerojatnost pojave poroznosti na središnjem dijelu odljevka gdje je velika debljina stijenke te koja posljednja skrućuje.

Za obje izvedbe uljevnog sustava provedena je optimizacija gibanja tlačnog klipa kako ne bi došlo do otkidanja vala i zarobljavanja zraka. Brzina gibanja klipa mora biti dovoljno velika da bi taljevina dosegla visinu tlačne komore prije početka druge faze, no pri većim brzinama i vjerojatnost otkidanja vala taljevine je veća. Izbjegavanje pojave otkidanja vala postiglo se podešavanjem akceleracije klipa. Pokazalo se da je za slučaj veće popunjenosti tlačne komore taljevinom potrebna manja akceleracija klipa, jer u protivnom dolazi do otkidanja vala.

Na posljjetku je istražen utjecaj temperature predgrijavanja kokile na tijek punjenja i skrućivanje odljevka. Sa porastom temperature kokile očekivano je poraslo i vrijeme potrebno da se odljevak potpuno skrutne. Za najveću ispitanu temperaturu kokile, od 250°C, odljevku je trebalo gotovo 11 s (10,746 s) više u odnosu na temperaturu kokile od 150°C, da se potpuno skrutne. Simulacija nije pokazala značajan utjecaj temperature kokile na tijek punjenja kalupne šupljine iako je zamjetan brži pad temperature taljevine za niže temperature kokile. Kod odljevaka većih dimenzija takav bi pad temperature mogao dovesti do pojave grešaka kao što su nedolivenost ili hladni zavari. Rezultati simulacije za sva tri slučaja predgrijavanja kokile nisu pokazali značajne razlike što se tiče pojave poroznosti unutar odljevka.

LITERATURA

- [1] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1426253019-0-osnovetehnologijelijevanja.pdf, 15.03.2016.
- [2] Budić, B.: *Posebni lijevački postupci II.dio*, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2009.
- [3] <http://www.lipovica.hr/hr/tlacni-odljevci.html>, 15.03.2016.
- [4] Grupa autora: *ASM handbook volume 15: Casting*, ASM International, 1998.
- [5] <https://www.dynacast.com/die-cast-process>, 19.03.2016.
- [6] <http://www.nadca.org/education/online/courses/publications/101bk.pdf>, 19.03.2016.
- [7] Grupa autora: *ASM handbook volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, ASM International, 1998.
- [8] http://www.diecastingdesign.org/standards/402_pdf/chapter03.pdf, 20.03.2016.
- [9] Babić, S., Unkić, D.: *Ispitivanje utjecaja brzine druge faze na čvrstoću visokotlačnih odljevaka*, Ljevarstvo 50(2008)3, 81-88.
- [10] Hrgović, I.: *Plinska poroznost u aluminijskim tlačno lijevanim odljevcima*, Ljevarstvo 49(2007)2, 47-52.
- [11] http://www.visi-trak.com/Media/DCE_Article_Sim.pdf, 24.03.2016.
- [12] Jalili Nikroo, A., Akhlaghi, M., Najafabadi Ahmadi, M.: *Simulation and analysis of flow in the injection chamber of die casting machine during the slow shot phase*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 41.1-2(2009), 31-41.
- [13] Babić, S.: *Utjecaj parametara visokotlačnog lijevanja na kvalitetu odljevaka*, Ljevarstvo 49(2007)4, 87-95.
- [14] Andresen, B.: *Die casting engineering A hydraulic, thermal and mechanical process*, Marcel Dekker, New York, 2005.
- [15] Galić, M.: *Proizvodnja metalnih odljevaka: Priručnik*, Hrvatsko udruženje za ljevarstvo, Zagreb, 2008.
- [16] Hasse, S.: *Pogriješke na odljevcima*, Hrvatsko udruženje za ljevarstvo, Zagreb, 2003.
- [17] Fu, M.W., Yong, M.S.: *Simulation-enabled casting product defect prediction in die casting process*, International journal of production research, 47(2009)18, 5203-5216.
- [18] www.esigroup.com/sites/default/files/resource/brochure_flyer/1530/casting_brochure.pdf, 06.04.2016.

-
- [19]https://www.esigroup.com/sites/default/files/resource/other/4110/esi_procast_25years_july2015.pdf, 06.04.2016.
- [20] Lavtar, L., Petrić, M., Medved, J., Taljat B., Mrvar, P.: *Simulations od the shrinkage porosity of Al-Si-Cu automotive components*, Materials and technology, 46(2012)2, 177-180.
- [21]https://www.researchgate.net/profile/Ferruccio_Mandorli/publication/236615845_MOULD_DESIGN_PROCESS_IN_HIGH_PRESSURE_DIE_CASTING_SUPPORTED_BY_VIRTUAL_PROTOTYPING/links/0f31753b33773b04f0000000.pdf, 20.06.2016.